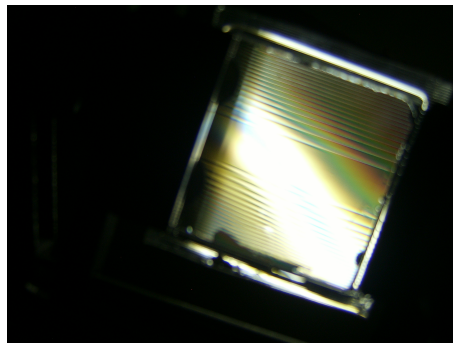


Université de Liège - Hololab - Centre Spatial de Liège



Etude d'un concentrateur solaire basé sur une combinaison optique diffractive/réfractive pour applications spatiales



Céline Michel

Thèse présentée en vue de l'obtention
du grade de Docteur en Sciences
Septembre 2015

Promoteur : Prof. S. Habraken
Jury : J. Surdej (ULg), S. Thibault (Univ. Laval), Ch. Barbier (CSL),
G. Kerschen (ULg), J. Loicq (CSL), S. Habraken (ULg)
Comité de thèse : T. Thibert, J. Loicq, G. Kerschen, Ch. Barbier

Cette thèse m'a non seulement offert l'occasion de venir rejoindre Gilles à Liège, mais m'a aussi donné l'opportunité de rencontrer des personnes formidables que ce soit à Hololab ou au Centre Spatial de Liège. Je pense qu'elles se reconnaîtront, je les remercie énormément pour les moments passés ensemble, que ce soit au labo, sur les temps de midi ou en dehors. Merci aussi au CSL de m'avoir accueillie pendant ces quatre années, et de plus dans un des bureaux les plus sympathiques ! Certaines personnes en particulier m'ont aidée à mener à bien ce projet de longue haleine qu'est une thèse, merci à vous. Je remercierai en particulier Jérôme Loicq pour son écoute continue, et évidemment mon promoteur Serge Habraken. Merci aussi aux quelques-uns qui ont eu le courage de lire ne fût-ce qu'une partie de ma thèse. Finalement, merci à ma famille de m'avoir soutenue dans tous mes projets, et surtout à toi Gilles, de m'avoir encouragée, écoutée, et d'avoir suivi avec patience toutes les étapes de ces quatre années : tu es le meilleur, je ne le répèterai jamais assez.

Cette thèse a été soutenue par une bourse FRIA (Fonds pour la Formation à la Recherche dans l'Industrie et dans l'Agriculture).

Abstract

Continued demand for new applications from spacecrafts leads to larger power needs. For most of them, the primary energy sources are solar panels. However, these solar panels are heavy and expensive, mainly due to solar cells and their coverglass. The power need increase requires thus new concepts of solar panels.

Furthermore, space environment is highly constraining: the vacuum limits heat transfer since convection is not allowed, there is contamination modifying the light spectrum reaching cells, ultraviolet light induces a yellowing of silicone glue, radiations degrade photovoltaic cells, etc. Usually, multi-junctions (MJ) cells are used, that are strongly sensitive to spectral modification in their incident spectrum due to their series connected structure (the worst cell defines the whole output performance). The power dimensioning of solar panels is then based on end of life (EOL) PV cells expected performance. Reducing the sensitivity to increase EOL output power is then another challenge for space applications.

This thesis aims to answer to both problems, by the proposition and study of a new lightweight solar concentrator with spectral splitting. This conceptual concentrator is composed of a Fresnel lens for sunlight concentration, coupled to a surface relief diffraction grating to spectrally split incident light, forming a single optical element in silicone.

The concentration behavior allows a reduction of solar cells area (including its coverglass), replaced by a lightweight silicone lens, reducing the global cost and mass. The lateral spectral separation will permit other types of cells than the usual MJ cells. To demonstrate the concept, two single junctions (SJ) solar cells are placed side by side, the first collecting visible light, the second collecting near IR light. Since cells are electrically independent, sensitivity is lower and EOL output power can surpass standard MJ cells systems. Moreover, cells combination is nearly free: all photovoltaic technology can be used and combined, opening the solar concentration field to other technologies than MJ.

This work studies and evaluates the pros and cons of diffraction grating/Fresnel lens combinations as solar concentrator with spectral splitting. The analysis includes the choice of material, optical developments and optimizations (grating selection, freeform lenses, grating period optimization along the lens, etc.), electrical modeling and methods to find the best cells combination as well as the modeling of expected output power, a thermal simulation, weight and deployment considerations, and approaches of sensitivity with spectral modifications. Some experimental results complete the study.

Two main configurations were developed: a first with a blazed grating, and a second with a symmetrical lamellar grating. Both configurations, after optimization, show similar performances: a global geometrical concentration ratio around $5\text{-}6\times$ (ratio between lens width and the total width of the two cells), a tracking error tolerance up to 0.7° , no drastic degradation with respect to deformations, fabrication errors, etc., an output power at begin of life (BOL) better than a classical concentrator focusing on a SJ cell or a planar solar panel composed of SJ cells. Both configurations present also a BOL specific mass [kg/W] lower than a classical planar solar panel covered by MJ cells, and a lower sensitivity to space environment, with theoretical larger EOL output power depending on chosen PV cells combinations. Existing deployment systems are proposed and discussed. Also, an experimental prototype of the optical element was realized, with optical results close to simulations. Some adaptations to terrestrial concentrators, other spectra, or using more than 2 different SJ cells are also introduced, highlighting the versatility of our concept.

Results demonstrate thus the coherence of the concept, leading to experimentally feasible and quite tolerant concentrator, with interesting cost reduction thanks to concentration and specific weight reduction. However, optical losses due to the non-perfect spectral splitting of the grating is too high to be able to surpass MJ cells systems BOL up to now, and the lower sensitivity of our concentrator cannot completely compensate this lack of performance at EOL. To reach better performances than MJ systems, from cost, mass, radiation resistance, etc. point of view and to exploit the obvious gain in sensitivity, the concentrator needs thus further investigations mainly related to cells combinations. Especially as our concept opens a lot of opportunities thanks to the complete independence of cells: other technologies are allowed, specific coatings can improve performances, ... Applications for Earth or places with different/changing incident spectra is another plausible perspective. Our concentrator with spectral splitting can also be a major advantage for specific scientific space missions like deep space missions.

Résumé

La charge technologique toujours croissante des satellites implique une augmentation de leurs besoins en puissance électrique. Dans la majorité des cas, les panneaux solaires sont la source d'énergie primaire du satellite. Cependant, ces panneaux sont lourds et coûteux, principalement à cause des cellules solaires et de leur protection en verre. Cette demande constante de puissance nécessite donc de nouveaux concepts de panneaux solaires.

Par ailleurs, l'environnement spatial est très contraignant : le vide spatial limite les transferts de chaleur puisque la convection n'est pas permise, les surfaces optiques peuvent être contaminées, modifiant le spectre de la lumière atteignant les cellules photovoltaïques (PV), les rayons ultraviolets induisent un jaunissement des colles en silicone, les radiations dégradent les cellules PV, etc. Habituellement, des cellules multi-jonctions (MJ) sont utilisées. Leur structure connectée en série les rend cependant fortement sensibles aux modifications spectrales (c'est la moins efficace des jonctions qui contrôle la performance globale de la cellule). Le dimensionnement des panneaux solaires est donc basé sur les rendements des cellules attendus en fin de mission (EOL). La réduction de cette sensibilité pour accroître la puissance de sortie EOL est donc un autre défi pour les applications spatiales.

Cette thèse a pour but de répondre aux deux problèmes mentionnés ci-dessus, par la proposition et l'étude d'un nouveau concentrateur solaire avec séparation spectrale. Ce concept est basé sur un unique élément optique en silicone, composé d'une lentille de Fresnel pour la concentration solaire, couplée à un réseau de diffraction en relief de surface pour séparer spectralement la lumière.

La concentration permet alors une réduction de la surface nécessaire de cellules solaires (et de leur protection en verre) qui est remplacée par un élément optique léger en silicone. Le coût global et la masse seront donc réduits. La séparation spectrale latérale va permettre l'utilisation d'autres types de cellules que les cellules MJ. Pour démontrer le concept, deux cellules simple jonction (SJ) sont placées côte-à-côte, la première collectant la lumière visible, la seconde la lumière proche IR. Etant donné que les cellules sont ici électriquement indépendantes, la sensibilité est plus faible et les performances EOL surpasseront potentiellement celles de systèmes standards à cellules MJ. De plus, notre concentrateur offre un choix presque libre de combinaisons de cellules PV. Ainsi, toutes les technologies photovoltaïques peuvent être utilisées et combinées, ouvrant le domaine de la concentration solaire à d'autres types de cellules que les MJ.

Durant ce travail, les avantages et inconvénients des combinaisons réseau de diffraction/lentille de Fresnel comme concentrateur solaire avec séparation spectrale, ont été étudiés et évalués. L'analyse inclut le choix des matériaux, les développements et optimisations optiques (sélection des réseaux, lentille « free-form », optimisation de la période du réseau le long de la lentille, etc.), un modèle électrique des cellules ainsi que le développement d'une méthode pour déterminer la combinaison optimale de cellules, des simulations thermiques, des considérations sur la masse et le déploiement, et l'approche de la sensibilité du concentrateur lors de modifications spectrales. Des résultats expérimentaux complètent l'étude.

Deux configurations principales ont été développées : la première avec un réseau blazé, la seconde avec un réseau lamellaire symétrique. Les deux configurations optimisées démontrent des performances similaires : un taux de concentration géométrique global autour de $5\text{-}6\times$ (rapport entre la largeur de la lentille et la dimension totale des deux cellules PV), une tolérance au dépointage jusqu'à 0.7° , un design relativement tolérant aux déformations, erreurs de fabrication, etc. , et une puissance en début de mission (BOL) meilleure que celle d'un concentrateur classique focalisant sur une cellule SJ, ou un panneau plan couverts de cellules SJ. Les deux configurations présentent aussi une masse spécifique [kg/W] BOL inférieure à celle d'un panneau plan classique couvert de cellules MJ, et une sensibilité inférieure à l'environnement spatial, impliquant une puissance de sortie EOL théoriquement supérieure selon la combinaison de cellules PV choisie. Des systèmes de déploiement sont par ailleurs proposés et discutés. Un prototype expérimental de l'élément optique a de plus été réalisé, démontrant des résultats optiques proches des simulations. Finalement, certaines adaptations du concept pour des applications terrestres, d'autres spectres, ou avec plus de deux types de cellules PV sont aussi introduits, preuve de la versatilité de notre concept.

Les résultats démontrent donc la cohérence du concept proposé, qui se révèle faisable expérimentalement et relativement tolérant, avec un potentiel certain de réduction de coût grâce à la concentration et la réduction de la masse spécifique. Cependant, les pertes optiques dues à la séparation spectrale non-idéale du réseau ne nous permettent pas de surpasser les systèmes à cellules MJ en début de mission, et la sensibilité réduite de notre concentrateur ne compense pas complètement ce désavantage initial pour l'instant. Pour atteindre de meilleures performances que les systèmes MJ, du point de vue coût, masse, résistance aux radiations, etc., et tirer parti du gain en sensibilité, le concentrateur nécessite donc de plus amples investigations principalement au sujet des combinaisons de cellules PV. D'autant plus que le concept ouvre beaucoup d'opportunités grâce à l'indépendance des cellules : l'utilisation d'autres technologies non compatibles avec une structure MJ monolithique, des revêtements spécifiques pourront être adaptés à chaque cellule, etc. Des applications pour le terrestre ou dans des milieux dont le spectre incident varie, sont une autre perspective possible. Le concept peut aussi présenter des avantages majeurs pour des missions spatiales scientifiques spécifiques, par exemple « deep space ».

Table des matières

1	Introduction	1
	PARTIE I : Définition du design et motivation	3
2	Les concentrateurs solaires spatiaux et à séparation spectrale existants	3
2.1	Concentrateurs solaires spatiaux	3
2.2	Concentrateurs avec séparation spectrale	4
2.3	Situation du problème et solutions envisagées	6
3	Concept de base de notre concentrateur	8
3.1	Concept	8
3.2	Motivations	9
3.3	Objectifs et contraintes au niveau du concentrateur	10
	PARTIE II : Les bases	13
4	Eléments optiques	13
4.1	Lentille de Fresnel réfractive	13
4.1.1	Lentille de Fresnel	13
4.1.2	Théorie de la réfraction	15
4.1.3	Absorption	15
4.2	Réseaux de diffraction	16
4.2.1	Angles de diffraction	16
4.2.2	Calcul de l'efficacité de diffraction	17
5	Modèle des cellules photovoltaïques	20
5.1	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	20
5.2	Effets des conditions externes : taux de concentration, température, incidence	24
5.2.1	Evolution en fonction du taux de concentration	24
5.2.2	Evolution selon la température	24
5.2.3	Influence de l'angle d'incidence	25
5.3	Hypothèses pour le calcul des puissances électriques	25
5.3.1	Lumière incidente	25
5.3.2	EQEs réelles et idéales	26
5.3.3	Expressions empiriques	26

5.4	Détails des cellules utilisées	26
6	Environnement spatial	29
6.1	Spectre solaire AM0	29
6.2	Radiations	30
6.3	Vide spatial	31
6.4	Irradiation dans l'ultraviolet	31
6.5	Conclusions	34
7	Environnement thermique et principes de simulation	35
7.1	Environnement thermique	35
7.2	Sélection d'un panneau solaire	36
7.3	Principe des simulations thermiques	37
7.3.1	Schéma thermique	37
7.3.2	ESATAN®	39
7.4	Conclusions	39
	PARTIE III : Développements optiques et analyse du concept	41
8	Choix du matériau optique : Silicone DC93-500	41
8.1	Pourquoi le silicone DC93-500 ?	41
8.2	Indice de réfraction	42
8.3	Résistance aux radiations : film anti-UV	43
8.4	Problème de TacSat4 : déchirure de la lentille	44
8.5	Conclusions	46
9	Motivation, choix des réseaux et des cellules PV	47
9.1	Choix des réseaux de diffraction	48
9.2	Méthode pour le choix des combinaisons de cellules PV couplées à la longueur d'onde de blaze	50
9.3	Première approximation sur les performances idéales	52
9.4	Liberté du choix des cellules PV vs. DJ monolithiques	53
9.5	Conclusions	54
10	Développement et modélisation du concept optique	55
10.1	Définitions	56
10.1.1	Dimensions des taches focales	56
10.1.2	Taux de concentration géométrique	57
10.2	Méthode de simulation basée sur le raytracing	57
10.3	Contraintes sur la période du réseau de diffraction	58
10.3.1	Période minimale	58
10.3.2	Période maximale	60
10.3.3	Conclusions	60
10.4	Configuration blazée	61
10.4.1	Méthode pour l'optimisation du profil de la lentille de Fresnel	61
10.4.2	Méthode pour l'optimisation de la combinaison réseau/lentille	64
10.4.3	Premiers résultats	69

10.4.4	Configuration symétrique	70
10.4.5	Période variable	74
10.4.6	Concentrateurs secondaires	79
10.5	Configuration lamellaire	80
10.6	Conclusions	84
11	Résultats thermiques	85
11.1	Concentrateurs avec séparation spectrale	85
11.2	Panneaux plans/concentrateurs sans séparation spectrale	87
11.3	Influence des hypothèses	87
12	Performances des différentes configurations et comparaison	89
12.1	Définitions	90
12.1.1	Efficacité optique	90
12.1.2	Indicateur sur le rendement électrique	90
12.2	En termes d'EQEs parfaites	91
12.2.1	Combinaisons optimales des cellules et λ_{blaze}	91
12.2.2	Paramètres géométriques optimaux	91
12.2.3	Résultats optiques	92
12.2.4	Tolérances à l'angle d'incidence	96
12.2.5	Résultats en termes de puissance électrique	97
12.3	Avec des EQEs réalistes	98
12.4	Comparaison avec un panneau simple et avec un concentrateur simple	98
12.4.1	Panneau plan	99
12.4.2	Concentrateur sans séparation spectrale	99
12.4.3	Dépendance avec la température	99
12.4.4	Conclusions	100
12.5	Conclusions	101
13	Tolérancement et pertes optiques	102
13.1	Sources de dégradations optiques	102
13.1.1	Erreurs de fabrication	103
13.1.2	Déformations	105
13.1.3	Erreurs d'assemblage	107
13.1.4	Modification de l'indice de réfraction	109
13.1.5	Approximations sur les valeurs des E_g et λ_{blaze}	111
13.2	Matrice de sensibilité et conclusion	111
14	Déploiement et bilan de masse	114
14.1	Mécanismes possibles pour le déploiement	114
14.1.1	Storable tubular extendible masts (STEM)	114
14.1.2	Exploitation du mécanisme de déploiement du panneau	117
14.1.3	Ressorts à torsion	117
14.1.4	Proposition d'un système de déploiement	118
14.2	Bilan de masse et comparaison avec un panneau plan	119

15 Bilan des avantages et limites du concentrateur	122
15.1 Avantages de la concentration	122
15.2 Avantages de la séparation spectrale	123
15.2.1 Puissance électrique en fin de vie	123
15.2.2 Effets d'une illumination non-uniforme	129
15.2.3 Choix libre des cellules PV	131
15.2.4 Revêtement	132
15.3 Conclusions	132
16 Perspectives d'applications terrestres et extraterrestres	133
16.1 Réseau à faibles périodes	133
16.2 Utilisation de 3 cellules SJ ou insertion d'une cellule DJ	133
16.3 Adaptabilité pour le terrestre	134
PARTIE IV : Etude expérimentale	137
17 Mesures expérimentales et comparaison avec la théorie	137
17.1 Résumé du projet Guide2Dye	138
17.2 Réseaux de diffraction	139
17.2.1 Vérification de la période du réseau	139
17.2.2 Mesure de l'efficacité de diffraction	140
17.2.3 Images et profils du réseau	141
17.2.4 Comparaison des résultats avec la théorie	142
17.3 Lentille	143
17.4 Caractérisation de la combinaison réseau/lentille	145
17.4.1 Dispositif pour la caractérisation du plan focal	145
17.4.2 Adaptation des simulations pour correspondre aux conditions de la mesure expérimentale	145
17.4.3 Comparaison théorie/expérimental	146
17.5 Conclusions	149
18 Réseau/lentille de Fresnel en silicone : faisabilité	150
18.1 Matériau : Silicone Sylgard 184	150
18.2 Approche méthodologique	151
18.3 Résultats	152
18.3.1 Images au microscope	153
18.3.2 Images du plan focal	153
18.4 Conclusions	155
PARTIE V : Conclusions générales	157
19 Conclusions générales et perspectives	157
Références	

Annexes	I
Annexe A Comportement des cellules PV sous LILT conditions	I
Annexe B Coefficients de Fresnel	II
Annexe C Efficacité des réseaux de diffraction	II
C.1 Validité de la théorie scalaire	II
C.2 Dépendance avec l'angle d'incidence	III
C.3 Longueur d'onde maximale diffractée selon la période	IV
Annexe D Caractéristiques du panneau solaire	V
D.1 Panneau MESSENGER et adaptation à notre situation	V
D.2 Caractéristiques thermiques des éléments du panneau	V
Annexe E Description des liens thermiques	IX
Annexe F Superposition du réseau sur la face arrière	X
Annexe G Le profil idéal est blazé	XII
Annexe H Configuration avec un réseau à faible période	XII
Annexe I Le raytracing et les principes de modélisation utilisés	XIV
I.1 Modélisation du soleil en 2D	XIV
I.2 Prise en compte de l'ombrage des dents de la lentille	XVI
I.3 Vérification des programmes Matlab®	XVII
I.4 Design du profil de la lentille	XVIII
Annexe J Période variable	XX
J.1 Design d'une lentille focalisant l'ordre 0	XX
J.2 Vérification de l'hypothèse d'épaisseur nulle et intégration d'une période variable dans le modèle ASAP®	XXI
Annexe K Simulations thermiques : effets des caractéristiques du panneau	XXV
Annexe L Tolérancement et pertes optiques	XXVII
L.1 Erreurs de fabrication	XXVII
L.2 Erreurs sur le réseau de diffraction	XXVIII
L.3 Déformations	XXX
L.4 Erreurs d'assemblage	XXXVI
L.5 Indice de réfraction	XXXIX
L.6 Correspondance entre E_g et λ_{blaze}	XLII
Annexe M Jaunissement du silicone sous VUV	XLIII
Annexe N Autres approches incluant plus de deux types de cellules solaires	XLV
N.1 Deux ordres de diffraction	XLV
N.2 Trois ordres de diffraction	XLVII
Annexe O Indices de réfraction	XLIX
O.1 Indices de réfraction des colles NOA	XLIX
O.2 Indice de réfraction du PMMA	XLIX
Annexe P Caractéristiques du réseau de diffraction G2D	L
Annexe Q Montage optique pour la mesure de l'efficacité de diffraction	LI
Annexe R Matériel pour le montage expérimental	LII
Annexe S Correction des erreurs d'alignement	LVI
Annexe T Caractéristiques du silicone Sylgard 184	LVII

Publications réalisées durant la thèse

Liste des symboles

Acronymes

AM0	Spectre solaire extraterrestre : « Air Mass Zero »
BOL	En début de mission : « Begin Of Life »
CFRP	Polymère à renfort fibre de carbone : « Carbon Fiber Reinforced Polymer »
C _{géo}	Taux de Concentration géométrique
CSL	Centre Spatial de Liège
DJ	Double-Jonctions
DSSC	Cellules photovoltaïques à colorant : « Dye-Sensitized Solar Cells »
EOL	En fin de mission : « End Of Life »
EQE	Efficacité Quantique Externe des cellules PV
FF	Facteur de Forme des cellules PV
G2D	Projet Guide2Dye, programme Erable, plan Marshall2.vert
GEO	Géostationnaire, pour qualifier l'orbite d'un satellite
IR	Lumière dans le spectre InfraRouge proche
MJ	Multi-Jonctions
SJ	Jonction simple, mono-jonction : « Single Junction »
SLA	Concentrateur « Stretched Lens Array »
TJ	Triple-Jonctions
UV	Lumière dans le spectre UltraViolet
VIS	Lumière dans le spectre Visible
VUV	« Vacuum UV », lumière dans le profond UV

Symboles

c	Vitesse de la lumière dans le vide
$E_{g,x}$	Energie de la bande interdite de la jonction collectant l'ordre de diffraction x
η_{diff}^m	Efficacité de diffraction à l'ordre m
$\eta_{\text{lens}}^{\text{opt}}$	Efficacité de transmission de la lentille
η_{opt}	Efficacité optique globale
$\eta_{\text{opt}}^{\text{VIS/IR}}$	Efficacité optique pour l'intervalle spectral $S_{\text{VIS/IR}}$
e^-/p^+	Electron / Proton
f_{eff}	Distance focale effective de la lentille

Symboles

$F\#$	F-number de la lentille (rapport de sa largeur $-2R-$ et de sa focale effective $-f_{\text{eff}}-$)
h	Hauteur des dents du réseau de diffraction
h_{Planck}	Constante de Planck
I_L	Photocourant
I_0	Courant de saturation
I_{cc}	Courant de court-circuit
k	Coefficient de conductivité thermique
k_{Boltz}	Constante de Boltzmann
Λ	Période du réseau de diffraction
λ	Longueur d'onde de la lumière
λ_{blaze}	Longueur d'onde de blaze du réseau de diffraction
m	Ordre de diffraction considéré
n_x	Indice de réfraction du milieu x
<i>off-axis</i>	Décentrage de la lentille, c'est-à-dire décalage entre la position de la tache focale à l'ordre 1, et le centre géométrique de la lentille
P_{out}	Puissance électrique de sortie
$P_{\text{in tot}}$	Puissance totale incidente au niveau de la lentille
q	Charge d'un électron
R	Demi-largeur de la lentille
$S_{\text{VIS/IR}}$	Intervalle spectral convertible respectivement par la cellule VIS/IR
T	Température
$\theta_{90\%}$	Angle de dépointage tel que la performance demeure à 90% de sa valeur à incidence nulle
θ_{diff}^m	Angle de diffraction à l'ordre m
θ_{inc}	Angle d'incidence sur l'élément optique, mesuré par rapport à sa normale
θ_{out}	Angle de sortie de la lentille (dans l'air après l'élément optique)
θ_{sun}	Demi-ouverture angulaire du soleil (0.26°)
V_{oc}	Tension en circuit ouvert

Chapitre 1

Introduction

La concentration solaire

La concentration solaire consiste à utiliser un élément optique (réfractif ou réfléchissant généralement) pour concentrer la lumière qui lui est incidente sur une surface beaucoup plus petite. Ce concept a donc depuis toujours suscité de l'intérêt au niveau des applications photovoltaïques (PV), puisqu'il permet de réduire du facteur de concentration la surface de cellules PV nécessaire pour produire les mêmes performances électriques. Dans le cadre des applications terrestres, ceci permet l'utilisation de cellules PV à multi-jonctions (MJ) par exemple, qui sont beaucoup plus performantes que les cellules silicium classiques, mais aussi bien plus onéreuses. Dans le domaine spatial, le plus grand rendement surfacique des cellules MJ l'a emporté, même sans concentrateur solaire. Cependant, le coût et la masse de ces cellules (et leur verre protecteur) demeurent élevés par rapport aux autres composants du panneau solaire. C'est ainsi que l'étude de concepts de concentration solaire se justifie aussi dans le cadre d'applications spatiales. D'autant plus que la concentration (> 1 soleil) accroît le rendement des cellules PV, et que pour les missions lointaines où le flux n'est pas suffisant pour assurer un bon fonctionnement des cellules, la concentration réduit les pertes dues justement à la faible intensité et aux basses températures.

La séparation spectrale

Outre leur coût et leur masse élevés, les cellules solaires MJ présentent un autre désavantage de taille : c'est la moins performante des sous-jonctions qui régule le fonctionnement de toute la cellule. Ainsi, si l'intensité spectrale de la lumière incidente est modifiée et impacte par exemple la première jonction, les performances des deux autres jonctions vont aussi diminuer. Ce sera le même phénomène pour une dégradation non-égale des jonctions due aux ultraviolets (UV), radiations, variations du spectre incident à cause d'une perturbation de la source de lumière, d'un contaminant, d'une modification des caractéristiques des revêtements ou du verre protecteur, etc. De plus, les cellules MJ sont limitées dans le choix des combinaisons des jonctions par la condition de correspondance des mailles des réseaux des matériaux aux interfaces.

Pour contourner ces problèmes, une solution largement étudiée est la séparation spectrale : l'idée est de séparer/étaler spectralement la lumière incidente, de sorte à collecter des bandes spectrales plus étroites sur des cellules PV adaptées et électriquement indépendantes. En séparant spatialement l'équivalent des trois jonctions des cellules MJ, on

évite les problèmes de correspondance de courant entre les sous-jonctions, réduisant donc la sensibilité du système. De plus, sans empilement, le choix des cellules est beaucoup plus libre. Le challenge est alors de parvenir à une séparation spectrale efficace et adaptée aux cellules PV.

Combinaison de la concentration solaire et de la séparation spectrale

C'est ainsi que les concepts combinant concentration solaire et séparation spectrale ont du potentiel pour les applications photovoltaïques, notamment pour les applications spatiales où le coût et les dégradations sont très importants. De nombreuses études ont porté sur ce genre de systèmes hybrides, les références [1, 2] en regroupent un certain nombre. Cependant, la majorité des designs optiques pour les applications spatiales demeurent toujours au niveau du concept théorique, principalement à cause de leur complexité, de grandes pertes optiques, de leur masse conséquente ou de l'usage de matériaux inadéquats.

Projet de recherche et contenu de la thèse

Afin de pallier aux différentes faiblesses des concepts actuels, nous proposons donc un nouveau design de concentrateur solaire avec séparation spectrale relativement simple et léger puisque basé sur un unique élément optique plan en silicone. Celui-ci est composé d'une lentille de Fresnel pour la concentration solaire, et d'un réseau de diffraction pour la séparation spectrale et spatiale. Des cellules spécifiques spatialement et électriquement indépendantes collectent les différentes bandes spectrales dans le plan focal.

Le but de la thèse est d'étudier les possibilités qu'offrent les réseaux de diffraction combinés avec un élément réfractif en termes de séparation spectrale, d'efficacité optique et de taux de concentration, particulièrement en milieu spatial. L'étude se veut la plus complète possible en abordant non seulement les études purement optiques (la partie principale), mais aussi le choix des matériaux, l'étude des combinaisons des cellules PV, la proposition de systèmes de déploiement, et une étude thermique globale, de sorte donc à vérifier la viabilité de notre concept optique.

Le document est partagé en quatre parties. La première partie décrit les faits principaux ayant mené à notre concept de concentrateur, ainsi que le détail du design de base. La seconde partie reprend les bases utiles pour le développement du concept, que ce soit du point de vue électrique, optique ou thermique. La troisième partie, coeur de la thèse, décrit les étapes suivies lors de l'étude des possibilités offertes par notre concept : le choix du matériau, l'étude des réseaux de diffraction adéquats, l'optimisation des combinaisons des cellules PV, le développement et l'optimisation optique complète du concentrateur, les simulations thermiques, le tolérancement, un bilan de masse, la proposition de systèmes de déploiement, et une comparaison de nos résultats avec un panneau plan et un concentrateur simple focalisant sur une triple-jonction. La dernière partie relate nos réalisations expérimentales, à la fois pour tester la corrélation théorie/expérience, mais aussi la faisabilité de l'élément optique.

PARTIE I

Définition du design et motivation

*Cette première partie est dédiée à la mise en contexte
et la description des grandes lignes de notre design de base,
ainsi que de leurs motivations.*

Chapitre 2

Les concentrateurs solaires spatiaux et à séparation spectrale existants

Ce chapitre illustre le contexte de ce travail et met en avant les limitations des systèmes actuels. Il se conclut sur la réflexion menant à notre concept, démontrant comment celui-ci repousse ces limitations.

2.1 Concentrateurs solaires spatiaux

Les concentrateurs solaires pour le spatial n'ont pas vraiment le vent en poupe. Le domaine du spatial est en effet très conservateur et peu enclin à encourir les risques supplémentaires qu'engendre éventuellement un système de déploiement du concentrateur sans la preuve d'un gain très important, surtout concernant une des principales sources d'énergie du satellite. Cependant, avec l'augmentation constante des besoins de puissance des satellites et l'arrivée des cellules MJ (plus complexes et lourdes que les cellules silicium) [3], la concentration solaire devient une option à considérer dans les projets de recherche spatiaux. C'est en 1994 que la première expérience de concentration spatiale fut enfin lancée à bord du satellite PASP+ [4] comme vol de test, puis à bord de Deep Space 1 (SCARLET) en 1998 [5], cette fois comme source d'énergie principale. Ces concentrateurs étaient de type réfractif, composés d'un ensemble de lentilles d'abord en dômes, puis linéaires. Elles étaient réalisées au travers d'une lentille de Fresnel en silicone collée sur un support en verre, concentrant la lumière sur des cellules DJ à environ $100\times$ et $7.5\times$ respectivement. Les missions remplirent pleinement leurs objectifs, bien que le support en verre soit lourd et contraignant.

Par la suite, d'autres études ont montré l'avantage de la faible concentration pour le spatial [6], réduisant le coût global, mais évitant les dégradations thermiques et conservant une tolérance aux erreurs de pointage suffisante. C'est ainsi que divers projets de concentrateurs ont émergé, principalement réflectifs, tels des miroirs plans placés de part et d'autre des cellules PV, possédant un facteur de concentration inférieur à $3\times$. On peut citer par exemple l'expérience HS702 de Boeing [7, 8] et le projet ESP [9, 10, 11]. Si ce dernier fonctionna comme attendu, des soucis se présentèrent pour l'expérience de Boeing : la dégradation des cellules avec le temps fut beaucoup plus marquée qu'attendu. En cause

un déplacement des miroirs dû à la pression solaire, mais aussi la contamination des miroirs, modifiant la réflectivité spectrale et donc le contenu spectral atteignant les cellules MJ, réduisant ainsi drastiquement leurs performances. Rappelons que ces MJ sont particulièrement sensibles à ce genre de variations à cause de leur mise en série électrique, et que les concentrateurs en réflexion sont près de $100\times$ plus sensibles aux erreurs de forme que les réfractifs [12]. Cette dernière expérience a un peu réduit l'enthousiasme pour la concentration solaire.

Néanmoins, un groupe de recherche a persévéré et travaille sur l'amélioration du concept de SCARLET. Ils se sont attachés à l'alléger et réduire les exigences sur le pointage, en travaillant sur une lentille de Fresnel cylindrique et courbe en silicone DC93-500 sans support de verre. Le concept est décrit en Figure 2.1, et porte le nom de « Stretched Lens Array » (SLA). La lentille est étirée entre les montants, lui permettant de maintenir sa forme et d'absorber des déformations dues aux variations thermiques [13]. Ce concept a fait l'objet de nombreuses années de développements et de tests pour s'assurer notamment de sa viabilité en environnement spatial. Les études continuent actuellement principalement au niveau du déploiement et de l'exploitation de la souplesse des lentilles [14, 15, 16]. C'est dans cette lignée que s'inscrit notre projet de recherche, intégrant en plus la séparation spectrale.

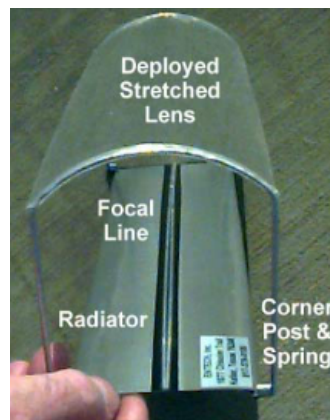


FIGURE 2.1 – Photographie d'un prototype du concentrateur « Stretched Lens Array » [12]. Le concentrateur est composé d'une lentille de Fresnel cylindrique et courbe en silicone DC93-500, étirée entre les montants et focalisant la lumière sur une ligne de cellules PV (taux de concentration autour de $8\times$).

2.2 Concentrateurs avec séparation spectrale

Les cellules photovoltaïques à multi-jonctions

Les cellules PV actuellement utilisées pour la concentration solaire ou les panneaux solaires des satellites sont majoritairement des cellules MJ, présentant le meilleur rendement atteignable à ce jour. Ces cellules PV sont composées de plusieurs sous-jonctions superposées monolithiquement, convertissant chacune une partie du spectre solaire. Ensemble, elles permettent d'atteindre des performances supérieures à celles d'une cellule

mono-jonction (SJ, pour « single-junction »). Cependant, de par leur configuration monolithique, ces cellules présentent de sérieuses limitations. En premier lieu, le choix des combinaisons de matériaux est limité à cause de la condition de correspondance des mailles des réseaux aux interfaces, nécessaire pour avoir une cellule efficace. Ensuite, la mise en série intrinsèque des différentes jonctions impose une correspondance de courant entre elles : le rendement électrique est dès lors dirigé par la moins performante des jonctions. Ces effets seront discutés plus en détails en section 5.1.

Ces contraintes ont donc deux effets principaux : limiter le rendement maximal que peut atteindre la cellule [17], et la rendre sensible aux modifications des conditions d'entrée (modification de spectre principalement).

Concepts avec séparation spectrale

Face aux contraintes des MJ, deux points de vue peuvent être pris : soit tenter de dépasser la limite d'efficacité maximale, soit réduire la sensibilité des cellules aux variations spectrales. Bien que différents, ces deux objectifs peuvent être abordés via la séparation spectrale. Deux solutions principales sont décrites en Figure 2.2 : soit passer par un empilement des jonctions avec un câblage indépendant pour chacune (cellules mécaniquement empilées [18]), soit travailler avec une séparation spectrale de la lumière incidente, permettant de rediriger chaque intervalle spectral vers la cellule la plus adaptée, électriquement indépendante des autres. Dans notre cas, c'est la seconde option qui a été choisie, plus simple électriquement et laissant une grande liberté sur le choix des cellules PV (pas d'optimisation de la transparence [19] comme dans la première option notamment).

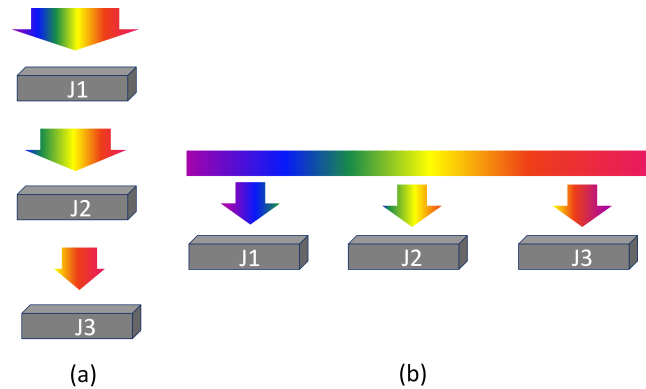


FIGURE 2.2 – Deux méthodes de séparation spectrale sur 3 jonctions (J1, J2 et J3) adaptées à différentes parties du spectre solaire : (a) Empilement de jonctions électriquement indépendantes, chacune collectant une partie du spectre et laissant passer le reste pour les jonctions suivantes. (b) Cellules spatialement et électriquement séparées, combinées avec un élément indépendant pour la séparation spectrale et spatiale.

La séparation spectrale peut être effectuée de bien des manières. Imenès et al. [1] et plus récemment les références [2] et [20] en font un résumé presque exhaustif. Les principes utilisés sont généralement basés sur la dispersion dans un matériau optique (prismes [21]), des surfaces dont la réflexion/transmission dépend de la longueur d'onde (miroirs dichroïques [22, 23, 24, 25]), le principe de luminescence [26], des filtres holographiques

[27, 28], la diffraction [29, 30], etc.

Les concepts pour les applications terrestres sont nombreux et démontrent pour la plupart un grand potentiel soit au niveau de l'efficacité théorique maximale, soit au niveau de la puissance moyenne annuelle produite, surpassant les performances des concepts à MJ. Cependant, dans le cadre d'applications spatiales, la plupart des méthodes proposées ont le désavantage d'être soit difficiles à mettre en oeuvre mécaniquement (typiquement les configurations en réflexion), soit d'être limitées en gamme d'angle d'incidence (par ex. efficacité de séparation spectrale fortement sensible angulairement) ce qui empêche un usage optimum lors d'un couplage avec un concentrateur ou une intolérance aux erreurs de pointage trop contraignante. On peut aussi citer les problèmes suivants : une efficacité optique trop faible, une masse trop importante, la nécessité de matériaux incompatibles avec les conditions de l'environnement spatial, etc. Ceci fait qu'aucune de ces solutions n'est actuellement suffisamment performante pour constituer une alternative aux panneaux plans classiques ou aux concentrateurs simples sur MJ.

2.3 Situation du problème et solutions envisagées

La liste ci-dessous reprend les points à améliorer au niveau des panneaux solaires spatiaux habituels, c'est-à-dire les panneaux plans couverts de cellules MJ :

1. le coût élevé des cellules solaires,
2. la masse importante des cellules et de leur verre protecteur (prenant la place d'une autre potentielle charge utile à cause de la limitation de masse au lancement),
3. la puissance en fin de vie (la puissance de design) réduite compte tenu des dégradations tout au long de la mission,
4. la fiabilité de l'ensemble (primordiale puisque les panneaux solaires sont souvent la source principale de puissance du satellite).

Pour solutionner les deux premiers problèmes, la concentration solaire est une bonne option, réduisant la surface de cellules et donc à la fois le coût et la masse. Il faut cependant que le concentrateur en tant que tel possède un coût et une masse par unité de surface bien inférieurs à ceux des cellules PV, de même qu'un mode de déploiement fiable et qualifiable pour un environnement spatial. Le concept du concentrateur SLA (Fig. 2.1) présente de nombreux avantages et servira de base pour la partie concentration. Par ailleurs, la concentration permet aussi un meilleur fonctionnement des cellules solaires pour des missions lointaines pour lesquelles les panneaux classiques rencontrent des problèmes de trop faible puissance incidente et de basses températures (voir [Annexe A](#)).

Le troisième problème est lié à l'environnement spatial qui est très contraignant pour les panneaux solaires : sans la convection présente sur Terre, la chaleur s'évacue difficilement augmentant la température des cellules PV, les UVs et radiations dégradent les cellules PV et colorent la majorité des matériaux transparents, et il y a aussi la contamination venant du dégazage des éléments du satellite, etc. Tous ces paramètres, abordés dans les Chapitres 6 et 7, dégradent largement les performances en fin de vie (après typiquement 15 ans de mission pour un satellite de télécommunications) par rapport à celles en début de vie. C'est pourquoi c'est cette puissance en fin de vie qui dimensionne généralement le satellite. Or, comme expliqué ci-dessus, les cellules MJ sont particulièrement sensibles aux dégradations de par leur conception (connexion électrique en série des jonctions). Cette

sensibilité est généralement prise en compte lors de la fabrication de cellules PV pour le spatial, qui sont donc optimisées différemment que celles pour les applications terrestres. Cependant, avec la concentration solaire en plus, le spectre et l'uniformité de l'illumination sont d'autant plus altérés, rendant les systèmes à MJ encore plus sensibles. La séparation spectrale et spatiale du spectre incident pour le refocaliser sur des cellules SJ spatialement et électriquement indépendantes est une solution. Cette configuration rendrait dès lors le système beaucoup plus flexible et moins sensible aux modifications des conditions de fonctionnement. La séparation spectrale supprime aussi la condition de correspondance des mailles des réseaux aux interfaces des jonctions des cellules MJ. Ceci apporte donc en plus la possibilité de travailler avec d'autres types de cellules PV (plus légères, plus résistantes aux radiations, moins coûteuses, etc.), d'autres combinaisons d'énergies de bande interdite, ou encore d'utiliser des revêtements spécifiques à chacune [31], des optimisations avec des « quantum dots » ou autres pour chaque cellule indépendamment des autres. Chaque SJ peut donc être optimisée indépendamment, sans tenir compte de sa transparence [19], ou de la correspondance avec les autres jonctions. Dans le cadre du spatial, cette séparation spectrale a beaucoup de potentiel, même si les approches précédemment testées ne sont pas convaincantes.

Finalement, la question de la fiabilité exclut tous les systèmes trop complexes, c'est-à-dire la majorité de ceux à séparation spectrale précédemment proposés puisqu'ils nécessitent en général plus d'un étage à déployer, ou font appel à des matériaux non-adéquats pour l'environnement spatial.

Nous allons donc développer notre propre solution de concentrateur avec séparation spectrale, décrite dans le chapitre suivant. Cette solution se voudra à la fois moins coûteuse, plus légère, facile à déployer, relativement tolérante à un dépointage, simple et performante en fin de vie.

Chapitre 3

Concept de base de notre concentrateur

Pour répondre aux problèmes à la fois de masse, de coût, et de dégradation accélérée des cellules MJ, un design spécifique de concentrateur solaire avec séparation spectrale est proposé. L'idée est de combiner un élément concentrant la lumière et un élément séparant spectralement cette lumière, le tout en un unique élément optique pour des questions de simplicité. Ainsi, le concentrateur devrait réduire la surface des cellules PV utile pour produire la même puissance de sortie, et la séparation spectrale permettra l'utilisation de cellules SJ spatialement et électriquement indépendantes, supprimant par là les désavantages de la structure monolithique des cellules MJ. Les détails du design de base et de nos motivations sont repris dans ce chapitre.

3.1 Concept

L'idée de base du design est illustrée en Figure 3.1. Les différents éléments sont :

1. **Un réseau de diffraction en relief de surface** qui diffracte la lumière majoritairement en deux bandes spectrales. Il est par exemple possible d'optimiser un réseau blazé (décrit dans la section 4.2) de sorte que la lumière visible soit principalement diffractée à l'ordre 1, ne laissant quasiment que de la lumière proche infrarouge (IR) dans l'ordre 0.
2. **Une lentille de Fresnel plane et linéaire** qui focalise les deux parties de la lumière (respectivement diffractées dans les ordres 0 et 1) sur des cellules PV adaptées au spectre qui leur est incident.

La lentille et le réseau sont réalisés dans le même matériau (a priori en silicone DC93-500, comme l'est le concentrateur SLA, voir Fig. 2.1) comme un unique élément optique. Celui-ci est alors étiré entre les montants du concentrateur de sorte qu'il maintienne sa forme seul.

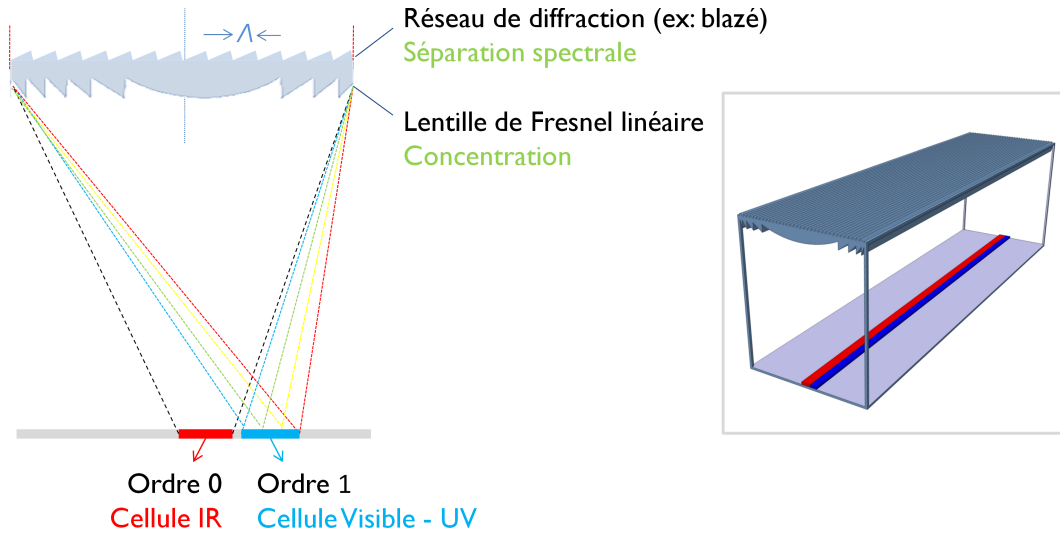


FIGURE 3.1 – Visions 2D et 3D du concept initial de notre concentrateur (l'échelle n'est pas représentative). L'élément optique est composé (1) d'un réseau de diffraction qui sépare spectralement la lumière incidente en deux parties principales, et (2) d'une lentille de Fresnel linéaire focalisant chaque partie sur des cellules PV spécifiques.

3.2 Motivations

Chaque élément du concept trouve sa justification dans les aspects évoqués au chapitre précédent (point 2.3), avec le détail ci-dessous :

(a) Lentille « fresnelisée »

Il est reconnu que le contour de la surface réfractive d'une lentille conventionnelle définit ses propriétés de focalisation. Le matériau substrat entre les surfaces réfractives n'a donc pas d'effet sur les propriétés optiques de la lentille autre que l'augmentation des pertes par absorption. Dans une lentille de Fresnel, le matériau substrat est réduit par extraction (voir Figure 3.2), de sorte principalement à diminuer la masse de la lentille [32]. C'est ce type de lentille qui est utilisé ici, pour des raisons évidentes de gain de masse.

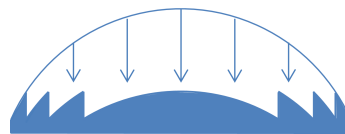


FIGURE 3.2 – Construction d'une lentille de Fresnel par extraction du substrat de la lentille pleine correspondante. La forme de chaque « dent » de la lentille de Fresnel doit être légèrement modifiée par rapport à la forme d'origine pour compenser la translation.

(b) Séparation spectrale par un réseau de diffraction en relief de surface

Il y a de nombreuses façons de réaliser la séparation spectrale, en partie abordées en section 2.2. Cependant, les conditions de l'environnement spatial, les contraintes thermoélastiques et la durée de vie requise, tendent à nous orienter vers un élément optique réalisé dans un unique matériau. La solution choisie est donc un réseau de diffraction en relief de surface travaillant en transmission, gravé dans le même sub-

strat que la lentille de Fresnel.

La condition de tolérance aux erreurs de pointage nous impose de travailler avec deux zones de concentration dans le plan focal (appelées par la suite « taches focales ») relativement éloignées l'une de l'autre de sorte à pouvoir surdimensionner les cellules PV pour tolérer une modification d'incidence. En sus, les deux faisceaux doivent être spectralement différenciés de sorte à convertir le plus efficacement possible une majorité du spectre solaire. Ceci implique l'usage de deux ordres de diffraction spectralement différents, et spatialement séparés. C'est ainsi que pour tout type de réseau, les deux ordres de diffraction employés sont les ordres 0 et 1 (et/ou -1), soit les seuls ordres de diffraction complètement dissociés. En effet, pour tous les autres ordres de diffraction m , la loi de la diffraction (cf. section 4.2) montre que deux longueurs d'onde liées par $\lambda_a/m_b = \lambda_b/m_a$ sont diffractées selon le même angle de diffraction. Par exemple, $\lambda = 400$ nm à l'ordre 2 a le même angle de diffraction que $\lambda = 800$ nm à l'ordre 1. De sorte à éviter toute superposition qui réduirait l'efficacité de séparation spectrale ainsi que la tolérance au dépointage, le choix est dès lors limité aux ordres de diffraction 0 et 1.

(c) Forme plane et linéaire

La planéité du concentrateur a été choisie pour simplifier le déploiement. Celui-ci pourrait être effectué par un déploiement vertical, sans volume de stockage supplémentaire dû à une éventuelle forme courbe. La forme linéaire par contre provient des problèmes thermiques et de pointage. Cette configuration évite en effet un taux de concentration trop élevé pouvant provoquer l'apparition de points chauds, et réduit drastiquement les contraintes sur la précision de pointage selon l'axe linéaire (aussi appelé axe cylindrique). Finalement, l'aspect linéaire permet une fabrication à bas coût et rapide grâce à l'utilisation de technologies roll-to-roll [33, 34].

3.3 Objectifs et contraintes au niveau du concentrateur

L'objectif général est donc d'explorer et d'optimiser les possibilités de ces combinaisons réseau de diffraction en relief de surface/lentille de Fresnel en termes de taux de concentration, efficacité de séparation spectrale, efficacité optique et performances électriques potentielles pour une application dans le spatial, ainsi que de vérifier leur viabilité dans cet environnement. Chaque élément est donc étudié, principalement optiquement puisque c'est la partie la plus innovante, mais la faisabilité sera aussi approchée via des simulations thermiques, une revue sur les systèmes de déploiement possibles, et des tests en laboratoire.

Outre la configuration globale et les problèmes de viabilité en environnement spatial, les principales contraintes sur le design concernent le taux de concentration et la tolérance au dépointage.

Tolérance aux erreurs de pointage

Les questions d'alignement avec le soleil sont déterminantes pour les performances du concentrateur, et demeurent un point critique et limitatif pour les applications spatiales. En effet, à la capacité d'alignement du panneau en lui-même, s'ajoute l'imprécision des articulations mécaniques des panneaux, la déformation des grands panneaux notamment liée à la pression solaire induisant une légère courbure, etc. Il en résulte qu'il n'est pas

réaliste d'espérer une précision d'alignement supérieure à $\pm 0.5^\circ$ à 1° , ce qui est devenu une norme au niveau des satellites de télécommunications. Notons cependant que la sensibilité aux erreurs de pointage dépend aussi de la divergence du soleil perçue au niveau du concentrateur. La contrainte est donc un peu plus facile à respecter pour les missions plus lointaines, comme la taille angulaire du soleil diminue. L'objectif que nous nous sommes fixé est moins de 10% de pertes pour un angle de dépointage supérieur à $\pm 0.5^\circ$, idéalement $\pm 1^\circ$.

Taux de concentration

Le but d'un concentrateur solaire est de maximiser le taux de concentration, à savoir le rapport entre la surface des cellules PV et la surface de l'élément optique (la lentille dans notre cas). Cependant, dans le cadre d'applications pour le spatial, chaque configuration possède un taux de concentration maximum à ne pas dépasser pour éviter l'apparition de points chauds, la dégradation des performances liée à l'augmentation de la température des cellules PV, et finalement la dégradation physique de ces cellules. Les concentrateurs développés pour le spatial avaient un taux de concentration entre $3\times$ (ESP), $8\times$ (SCARLET-SLA) et $100\times$ (Mini-dômes). La gamme est assez variable, mais les tendances pour un bon fonctionnement dans le spatial vont vers les faibles taux de concentration ($< 15\times$) [6]. Ainsi, nous veillerons à simuler la température maximale que pourront atteindre nos cellules selon les configurations obtenues, de sorte à éviter une surchauffe et leur dégradation. Notons toute fois que ce sera plus vraisemblablement la contrainte sur la tolérance à l'angle d'incidence qui limitera la taille des cellules, avant les dégradations thermiques.

PARTIE II

Les bases

Cette seconde partie décrit les principes, définitions et hypothèses utilisés pour étudier notre problème et développer le design de notre concentrateur. Les aspects constituant l'élément optique lui-même seront abordés en premier lieu, suivis d'un modèle simple utilisé pour décrire les cellules PV. Finalement, les conditions de l'environnement spatial et ses effets sur les panneaux solaires, en particulier les aspects thermiques, seront présentés.

Chapitre 4

Eléments optiques

Le concentrateur proposé se veut relativement simple, il n'est composé que de deux éléments optiques : un réseau de diffraction en relief de surface travaillant en transmission, et une lentille de Fresnel réfractive linéaire. Les notions de base nécessaires pour décrire le comportement optique de ces deux éléments sont résumées dans ce chapitre. Leur optimisation dans le cadre de notre concentrateur fera l'objet des Chapitres 9 et 10.

4.1 Lentille de Fresnel réfractive

4.1.1 Lentille de Fresnel

Comme dit précédemment, le choix pour la lentille s'est porté sur une lentille de Fresnel [35], réduisant la masse globale, sans pour autant dégrader significativement ses performances optiques.

Paramètres

Les paramètres importants définissant une lentille de Fresnel sont repris dans la Figure 4.1. Ils consistent en son diamètre ($= 2.R$, qui est en fait sa largeur dans le cas d'une lentille linéaire), sa distance focale effective f_{eff} , et son décentrage (distance entre le centre géométrique de la lentille et le centre de la tache focale au premier ordre de diffraction dans notre cas). Le $F\#$ de la lentille est défini comme le rapport entre la distance focale effective et son diamètre. Pour de très faibles épaisseurs de lentille, comme c'est le cas pour une lentille de Fresnel, les distances focales définies à partir de la face avant ou arrière de la lentille sont très proches (à moins d'1/1000 de la distance focale dans notre cas). Nous ne les différencierons donc pas, donnant le nom général de « focale effective » (f_{eff}) à la focale mesurée à partir de la face arrière.

Fabrication et imperfections

Bien qu'avantageuse point de vue masse, la « fresnelisation » entraîne cependant des pertes optiques : les lentilles de Fresnel sont particulièrement sujettes aux imperfections de fabrication.

Une lentille en silicone ne peut être gravée directement, elle est donc réalisée généralement par injection ou « impression » grâce à un moule préalablement usiné à cet effet. L'élément optique ainsi réalisé nécessite donc une phase de démoulage. Souvent, les imperfections de la réalisation proviennent directement du moule. Celui-ci

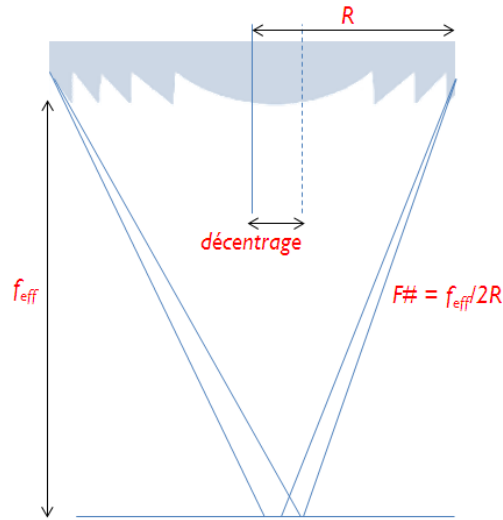


FIGURE 4.1 – Schéma d'une lentille de Fresnel reprenant ses principaux paramètres : la distance focale effective f_{eff} , le décentrage, la demi-largeur R et le $F\#$, soit $f_{\text{eff}}/2R$.

est couramment réalisé par « diamond turning » [36], impliquant une gravure par une pointe diamant extrêmement fine. La forme de cette pointe est cependant arrondie et légèrement inclinée donnant lieu à des arrondis et un angle (appelé « angle de dépouille », typiquement autour de 2°) dans le profil gravé. L'arrondi peut de plus être accentué par un remplissage partiel des structures lors de l'injection. Ces défauts de fabrication seront abordés en section 13.1.1. Notons que même avec un profil parfait, les dents de la lentille de Fresnel induisent un « ombrage » pour tout rayon non-normal au profil, comme l'illustre la Figure 4.2. La hauteur des dents étant faible par rapport à leur largeur, ces pertes sont presque négligeables dans le cas d'une incidence limitée à quelques degrés.

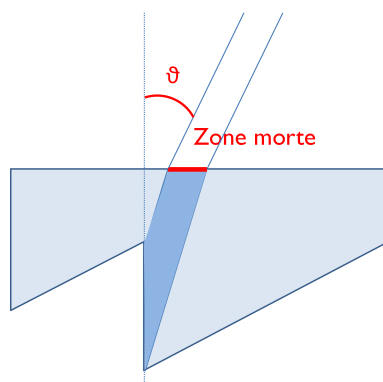


FIGURE 4.2 – Pertes optiques par ombrage pour une incidence non-nulle, malgré un profil parfait. Le schéma n'est pas à l'échelle : les hauteurs sont bien inférieures aux largeurs des dents, induisant de très faibles pertes pour une incidence de quelques degrés.

4.1.2 Théorie de la réfraction

Les lentilles de Fresnel réfractives suivent les lois de la réfraction, soit la loi de Snell-Descartes [37] :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (4.1)$$

Cette loi décrit le comportement géométrique des rayons traversant une interface entre un milieu d'indice n_1 et un milieu d'indice n_2 . θ_1 et θ_2 sont respectivement les angles dans le milieu 1 avant l'interface, et dans le milieu 2 après traversée de l'interface. Les angles sont définis par rapport à la normale à l'interface.

Les réflexions aux interfaces sont quant à elles décrites via les coefficients de réflexions de Fresnel, dont les expressions peuvent être trouvées en référence [38], rappelées en [Annexe B](#).

4.1.3 Absorption

L'indice de réfraction est un nombre complexe (\tilde{n}) [39], dont la partie imaginaire est liée à l'absorption du matériau (α) : on l'appelle aussi le coefficient d'extinction. Leur relation est la suivante, dépendant de la longueur d'onde λ :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi \cdot \Im(n(\lambda))}{\lambda} \quad (4.2)$$

Evidemment, les pertes par absorption s'amplifient plus l'épaisseur du matériau absorbant traversée est grande. Cette dépendance est exprimée par la loi de Beer-Lambert :

$$T = T_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (4.3)$$

avec T la partie transmise au travers d'un film d'épaisseur d , et T_0 la partie transmise dans le cas sans absorption.

4.2 Réseaux de diffraction

Un réseau de diffraction est un élément optique possédant une structure périodique de relativement faible période (de l'ordre d'une à quelques dizaines de fois la longueur d'onde), séparant et diffractant la lumière, comme l'illustre la Figure 4.3. Un réseau de diffraction se caractérise à la fois par ses propriétés géométriques de diffraction (cf. angles de diffraction), et ses courbes d'efficacité de diffraction, définissant la répartition de la lumière incidente dans les différents ordres de diffraction.

Il y a divers types de réseaux de diffraction (holographiques, en relief de surface, fonctionnant en transmission ou en réflexion, de phase, en volume, etc.). Le cas qui nous intéresse et qui sera décrit dans la suite, est celui des réseaux en relief de surface travaillant en transmission. Les propriétés de séparation et diffraction de ce type de réseau dépendent de la période du réseau (Λ) et de la forme du profil d'une période. La hauteur h de ce profil est particulièrement importante comme nous allons le voir dans les points suivants.

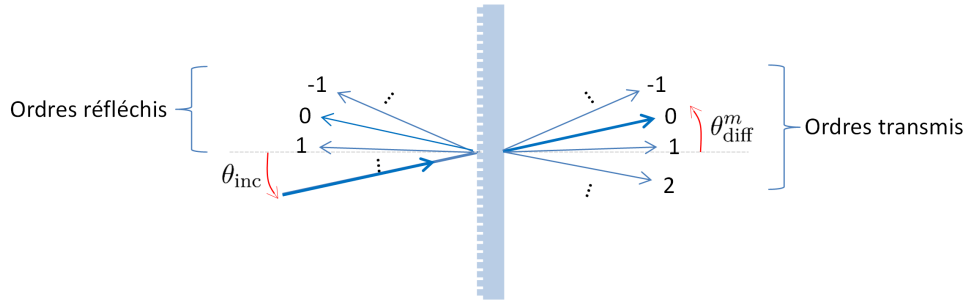


FIGURE 4.3 – Géométrie de la diffraction : la lumière incidente se répartit entre les ordres de diffraction transmis et réfléchis, selon la courbe d'efficacité de diffraction. Les directions de ces ordres de diffraction sont déterminées par la période du réseau, via l'équation (4.4). Le schéma n'est pas à l'échelle.

4.2.1 Angles de diffraction

Que l'on utilise une théorie rigoureuse ou simplifiée pour simuler l'efficacité de diffraction du réseau en relief de surface travaillant en transmission, l'équation de diffraction donnant les angles de diffraction à chaque ordre m en fonction de la longueur d'onde est la suivante :

$$n_3 \sin(\theta_{\text{diff}}^m) = n_1 \sin(\theta_{\text{inc}}) - m \cdot \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (4.4)$$

où θ_{diff}^m est l'angle de diffraction de la lumière à l'ordre m dans le milieu de sortie d'indice n_3 , θ_{inc} est l'angle d'incidence de la lumière dans le milieu d'indice n_1 , λ est la longueur d'onde de la lumière dans le vide, et Λ est la période du réseau de diffraction. Ainsi, l'angle de diffraction augmente avec la longueur d'onde et avec l'ordre de diffraction. Il est aussi d'autant plus grand que la période est petite.

Deux remarques utiles peuvent être émises sur cette équation :

- L'angle de diffraction à l'ordre m et à la longueur d'onde λ est le même que celui à l'ordre 1 à la longueur d'onde $m \cdot \lambda$. Il y a donc superposition des longueurs d'onde entre ordres de diffraction. C'est ce qui justifie notre choix de la section 3.2, qui était de travailler avec les ordres 0 et 1, c.-à-d. les deux seuls ordres complètement dissociés.

- Lorsque l’angle de diffraction atteint 90° , la lumière n’est plus transmise et l’ordre de diffraction devient évanescent. C’est notamment le cas pour les grands ordres de diffraction et les grandes longueurs d’onde lorsque la période du réseau est très petite. Dans ce cas, il est envisageable de ne transmettre que les ordres 0 et 1 par exemple, jusqu’à une certaine longueur d’onde limite dont l’angle de diffraction vaut 90° , les ordres supérieurs étant alors évanescents. Toute la lumière transmise l’est donc uniquement dans ces deux ordres, ce qui évite les pertes dans les ordres supérieurs que l’on rencontre avec des réseaux à plus grandes périodes. Ceci est illustré en Annexe C.3.

4.2.2 Calcul de l’efficacité de diffraction

Au point de vue de l’efficacité de diffraction, deux approches sont possibles : soit on l’étudie grâce à une des théories rigoureuses de la diffraction [40], soit on travaille avec une théorie simplifiée comme la théorie scalaire [41]. En général, la théorie scalaire est considérée comme suffisamment précise lorsque la période du réseau est supérieure de 5 à $10\times$ la longueur d’onde [42, 43]. Avec cette gamme de période de réseau, on évite l’apparition d’une sensibilité de l’efficacité de diffraction avec la polarisation, l’augmentation des effets d’ombrage [44] et des effets inter-périodes [45, 46] et donc une diminution de cette efficacité de diffraction (cf. Annexe C.1). Ainsi, plus la période est grande, plus les pertes seront faibles, et plus l’efficacité de diffraction notamment de l’ordre 1 sur une large gamme spectrale sera élevée. De plus, dans le domaine scalaire, l’efficacité de diffraction est fort peu sensible à l’angle d’incidence (Figure C.3). Cette théorie scalaire a par ailleurs l’avantage de consommer beaucoup moins de temps de calcul que les méthodes plus rigoureuses, elle est plus simple, et permet donc d’intégrer l’efficacité de diffraction dans l’optimisation optique rapidement. Les théories rigoureuses sont par contre plutôt utilisées en guise de vérification, une fois que les caractéristiques du réseau sont fixées.

Dans notre cas, pour autant que la période du réseau le permette, nous travaillerons avec la théorie scalaire pour l’optimisation, et peaufinerons les résultats avec des simulations via le programme PC-Grate[®], qui implémente une théorie rigoureuse de la diffraction pour les réseaux en relief de surface, basée sur une méthode intégrale [47]. Les équations principales de la théorie scalaire sont décrites ci-dessous.

Théorie scalaire

Equations

Dans le cas de la théorie scalaire, l’efficacité de diffraction est calculée sur base de la transformée de Fourier du déphasage induit sur l’onde incidente par le profil particulier du réseau de diffraction. Ainsi, pour un profil quelconque, on peut écrire l’équation de transmission suivante [42] :

$$t(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(x - m\Lambda) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{\Lambda}\right) \cdot \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot z(x)\right) \quad (4.5)$$

avec $\Delta n = (n(\lambda) - n_{\text{ambient}})$, n_{ambient} et n respectivement les indices de réfraction du milieu ambiant et du matériau dans lequel est gravé le réseau, et $z(x)$ le profil d’une dent du réseau. Dans cette équation, la fonction « delta » (δ) définit la périodicité du réseau, la fonction « rectangle » (rect) définit une zone de largeur égale à la période,

et l'exponentielle traduit le déphasage subi par la lumière en tout point du réseau. En champ lointain, la distribution d'amplitude est le carré de la transformée de Fourier de la transmittance. Cette définition est applicable à toute forme de profil du réseau, qu'elle soit blazée, lamellaire, ou quelconque. Un exemple pour le cas simple d'un réseau blazé est repris au point suivant.

Notons que l'approximation scalaire est développée pour une incidence normale. Cependant, comme introduit précédemment, dans le domaine scalaire l'efficacité de diffraction est fort peu sensible à l'angle d'incidence. Ainsi, par exemple, des simulations rigoureuses montrent que l'efficacité de diffraction d'un réseau en transmission blazé ne varie que très peu pour des angles d'incidence inférieurs à 10° , dans le cas de périodes supérieures à une dizaine de microns, comme décrit en Annexe C.2. Dans ces limites, elle peut donc toujours être considérée comme valable.

Réseau blazé

Dans le cas d'un réseau blazé, le profil des dents suit l'expression $z(x) = h.x/\Lambda$, avec h la hauteur des dents du réseau. Ainsi, la transformée de Fourier de la fonction de transmission t donne le résultat suivant :

$$F(t) = F \left\{ \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(x - m\Lambda) \right\} \cdot F \left\{ \text{rect} \left(\frac{x}{\Lambda} \right) \cdot \exp \left(\frac{i2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot z(x) \right) \right\} \quad (4.6)$$

$$= \left\{ \frac{1}{\Lambda} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta \left(f - \frac{m}{\Lambda} \right) \right\} \cdot \left\{ \Lambda \cdot \text{sinc} \left(\pi \Lambda \left(\frac{\Delta n}{\lambda} \cdot \frac{h}{\Lambda} - f \right) \right) \right\} \quad (4.7)$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta \left(f - \frac{m}{\Lambda} \right) \cdot \text{sinc} \left(\pi \Lambda \left(\frac{\Delta n \cdot h}{\lambda \cdot \Lambda} - f \right) \right) \quad (4.8)$$

A partir de l'équation (4.8), on en déduit l'amplitude de l'ordre de diffraction m (a_m) et finalement l'efficacité de diffraction de l'ordre m (η_{diff}^m) définis dans les équations (4.9) et (4.10).

$$a_m = \text{sinc} \left(\pi \left(\frac{\Delta n}{\lambda} \cdot h - m \right) \right) \quad (4.9)$$

$$\eta_{\text{diff}}^m = [a_m]^2 = \left[\frac{\sin \left(\pi \left(\frac{\Delta n}{\lambda} \cdot h - m \right) \right)}{\pi \left(\frac{\Delta n}{\lambda} \cdot h - m \right)} \right]^2 \quad (4.10)$$

Ainsi, il existe un maximum à 100% au premier ordre de diffraction en transmission à une longueur d'onde λ_0 , pour une hauteur de dent h respectant l'égalité suivante :

$$h = \frac{\lambda_0}{\Delta n(\lambda_0)} \quad (4.11)$$

La longueur d'onde λ_0 pour laquelle l'efficacité est maximale à l'ordre 1, est nommée « longueur d'onde de blaze » (λ_{blaze}).

Réseau lamellaire

Le même raisonnement peut être tenu pour tout type de profil, et notamment pour un profil binaire par exemple, que nous nommerons ici « lamellaire ». Le développement et les équations dans ce cas-là sont repris en référence [48]. Un point intéressant à noter est que pour un réseau lamellaire symétrique, les ordres pairs s'annulent : il n'y

a donc pas de diffraction au second ordre. Cette caractéristique le rend intéressant pour notre concept, supprimant a priori les pertes dans l'ordre 2 au contraire du réseau blazé.

Exemples de courbes d'efficacités de diffraction

Des exemples d'efficacité de diffraction pour un réseau blazé et un réseau lamellaire symétrique sont repris en Figure 4.4. Notons le comportement différent des deux types de réseau, ainsi que l'absence d'ordre 2 pour le réseau lamellaire symétrique. Ces deux types de réseaux définiront les deux types principaux de concentrateurs que nous allons développer. Les raisons de ce choix sont explicitées en section 9.1.

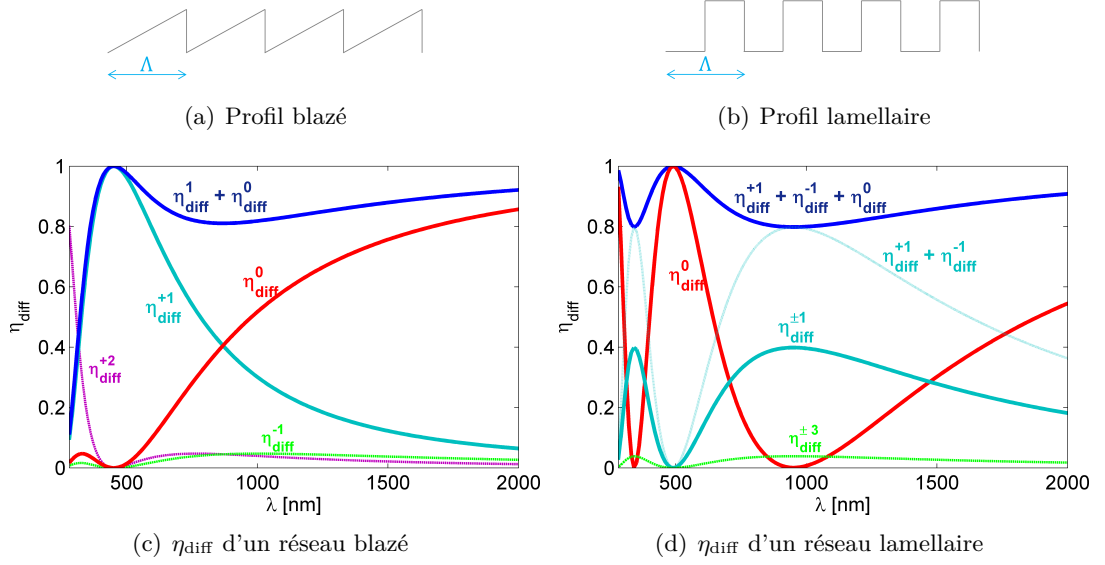


FIGURE 4.4 – Exemple de profil et d'efficacité de diffraction pour un réseau blazé (a-c) et un réseau lamellaire symétrique (b-d), avec une longueur d'onde de blaze de 500 nm. Les deux ordres de diffraction principaux sont l'ordre 0, et l'ordre 1, avec un maximum à λ_{blaze} dans l'ordre 1 pour le réseau blazé, et dans l'ordre 0 pour le réseau lamellaire. Les courbes sommées (ordres ± 1 et 0) présentent la lumière a priori utilisable pour notre concept de concentrateur, et mettent en évidence la partie intrinsèquement perdue dans les ordres supérieurs. Les profils (a-b) ne sont pas à l'échelle.

Conséquences de la théorie scalaire

Dans les limites de validité de la théorie scalaire, les paramètres du réseau de diffraction peuvent être considérés comme indépendants : la longueur d'onde de blaze (directement liée à la hauteur des dents) ne définit que l'efficacité de diffraction, tandis que la période du réseau ne joue que sur les angles de diffraction [49, 42]. Les deux paramètres peuvent donc être optimisés indépendamment, permettant de séparer les aspects d'efficacité de diffraction et les aspects géométriques.

Chapitre 5

Modèle des cellules photovoltaïques

Le design d'un concentrateur solaire implique le couplage avec les cellules photovoltaïques. L'optimisation de l'élément optique doit donc être conjointe avec celle du choix des cellules. Ce point sera abordé en section 9.2.

Pour cette optimisation, le calcul des performances attendues ainsi que l'établissement d'une comparaison avec des systèmes à MJ, il est nécessaire d'établir un modèle électrique des cellules PV. Un modèle simplifié mais représentatif des cellules PV a donc été développé. Les aspects principaux des comportements des cellules et les équations utilisées pour la suite sont repris dans ce chapitre.

5.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe de base des cellules PV a été découvert depuis plus d'un siècle et demi, et leur technologie a largement évolué depuis. Leur principe a été abondamment étudié et est maintenant relativement bien connu. Nous n'allons pas tout rappeler ici, mais simplement décrire les modèles qui nous seront utiles. Pour plus d'informations, le lecteur peut se reporter aux références [50, 51, 52, 53, 54].

Mono-jonctions

Une cellule PV a la propriété de convertir les photons qui lui sont incidents en paires électrons-trous et finalement en puissance électrique. Cette conversion a lieu lorsque l'énergie du photon incident est supérieure à l'énergie de la bande interdite de la cellule, avec une efficacité dépendant des nombreux mécanismes de pertes ayant lieu dans la cellule. Cette efficacité de conversion est représentée par l'efficacité quantique externe (EQE) de la cellule, décrivant donc le rapport entre le nombre de paires électron-trou générées et le nombre de photons incidents à la cellule. Des exemples d'EQEs sont repris en Figure 5.5. Le photocourant (I_L) produit par chaque cellule s'exprime donc via l'expression suivante :

$$I_L = \int E(\lambda) \cdot \frac{\lambda \cdot q}{h_{\text{Planck}} \cdot c} \cdot \text{EQE}(\lambda) d\lambda \quad (5.1)$$

où $E(\lambda)$ est l'irradiance de la lumière parvenant sur la cellule, q est la charge d'un électron, h_{Planck} est la constante de Planck et c est la vitesse de la lumière.

Le modèle électrique le plus simple d'une cellule photovoltaïque est celui à une diode, sans résistance série ni de *shunt*, illustré dans la Figure 5.1(a). A ce schéma correspond une courbe courant-tension de la cellule, esquissée dans la Figure 5.1(b). Ce modèle, bien qu'idéalisé, est généralement suffisant pour décrire une cellule photovoltaïque en fonctionnement normal. Les résultats seront donc un peu optimistes, mais représenteront une bonne approximation pour évaluer les possibilités de notre système optique.

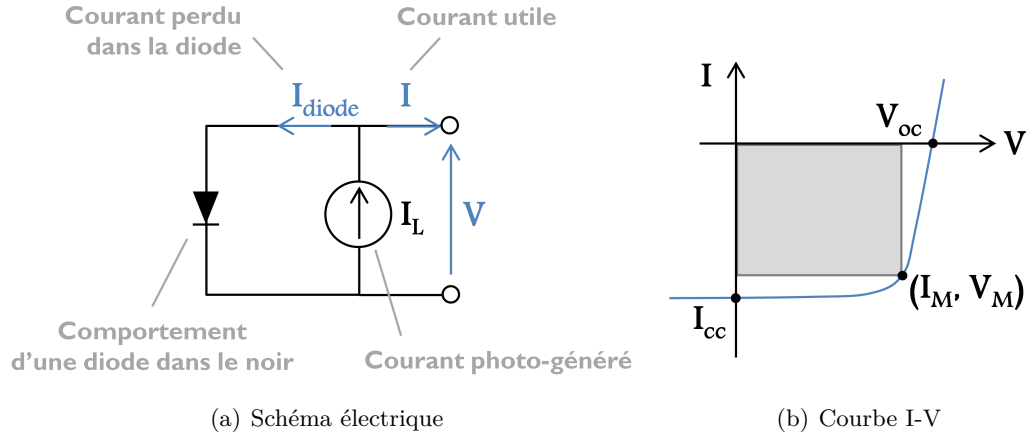


FIGURE 5.1 – (a) Modèle du circuit équivalent idéal à une diode d'une cellule solaire. (b) Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire reprenant ses paramètres principaux : le courant de court-circuit (I_{cc}) presque équivalent au photocourant (I_L), la tension en circuit ouvert (V_{oc}), et le facteur de forme (FF) lié à la surface grisée, représentant l'idéalité de la cellule ($FF = I_M V_M / I_{cc} V_{oc}$).

L'équation simplifiée du courant est la suivante, avec I_{diode} le courant perdu dans la diode, I_0 le courant de saturation, k_{Boltz} la constante de Boltzmann, T la température, V la tension et n_{id} un facteur d'idéalité (entre 1 et 2) :

$$I = I_L - I_{diode} = I_L - I_0 \left(e^{qV/n_{id}k_{Boltz}T} - 1 \right) \quad (5.2)$$

La puissance de sortie maximale de la cellule correspond aux courant I_M et tension V_M de la Figure 5.1(b), soit lorsque la surface carrée grise sous la courbe est maximale. Plus la courbe I-V sera « carrée », plus la cellule est idéale. Le facteur d'idéalité s'appelle Facteur de Forme (FF), et correspond au rapport de $V_M \cdot I_M$ et de $V_{oc} \cdot I_{cc}$ (la tension en circuit ouvert et le courant en court-circuit). Ainsi, la puissance électrique de sortie peut s'exprimer selon les équations suivantes :

$$P_{max} = V_M \cdot I_M = I_{cc} \cdot V_{oc} \cdot FF \quad (5.3)$$

$$\text{avec} \quad I_{cc} \approx I_L \quad (5.4)$$

$$V_{oc} = \frac{k_{Boltz}T}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (5.5)$$

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad (5.6)$$

Multi-jonctions

Une cellule multi-jonctions (MJ) est composée de minimum deux jonctions superposées et connectées en série. Leur fabrication est assez complexe car elle nécessite des interfaces sans défaut entre matériaux, de même qu'une correspondance entre la dimension des mailles cristallines des matériaux. Ce dernier point limite grandement les combinaisons possibles, comme l'illustre la Figure 5.2. La combinaison de jonctions est néanmoins optimisée pour correspondre au spectre solaire de sorte que chaque intervalle spectral soit converti le plus efficacement possible, dans les limites des combinaisons autorisées. Dans les cellules triple-jonctions (TJ), il y a trois jonctions avec des énergies de bande interdite décroissantes en partant du haut : la première convertit les courtes longueurs d'onde, et laisse passer le reste pour la seconde, qui convertit la fin du visible, la troisième reçoit et convertit l'IR. Le principe est illustré par la Figure 5.3. Le rendement global est donc meilleur qu'avec une mono-jonction (SJ pour « single-jonction »), mais présente les désavantages de la mise en série des jonctions et de leur méthode de fabrication, impliquant une plus grande sensibilité et complexité.

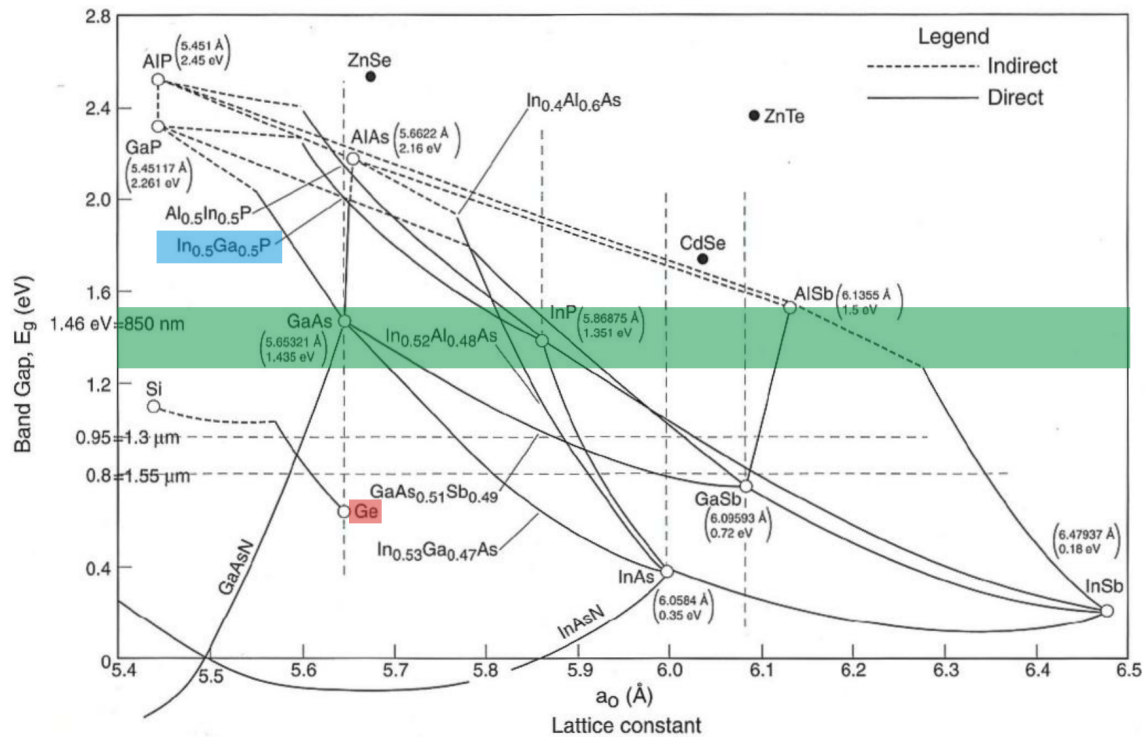


FIGURE 5.2 – Energies de bande interdite de certains matériaux en correspondance avec leur dimension de maille cristalline. Les combinaisons potentielles de matériaux pour une cellule MJ sont limitées à ceux dont correspondent les dimensions de maille de réseau [50]. Une combinaison courante de TJ est colorée dans le graphique : InGaP/GaAs/Ge.

En effet, dans une cellule multi-jonctions, à cause de la mise en série des différentes jonctions, le photocourant global correspond au plus petit des photocourants générés par les cellules PV, tandis que les tensions s'additionnent. On a donc, en négligeant les jonctions

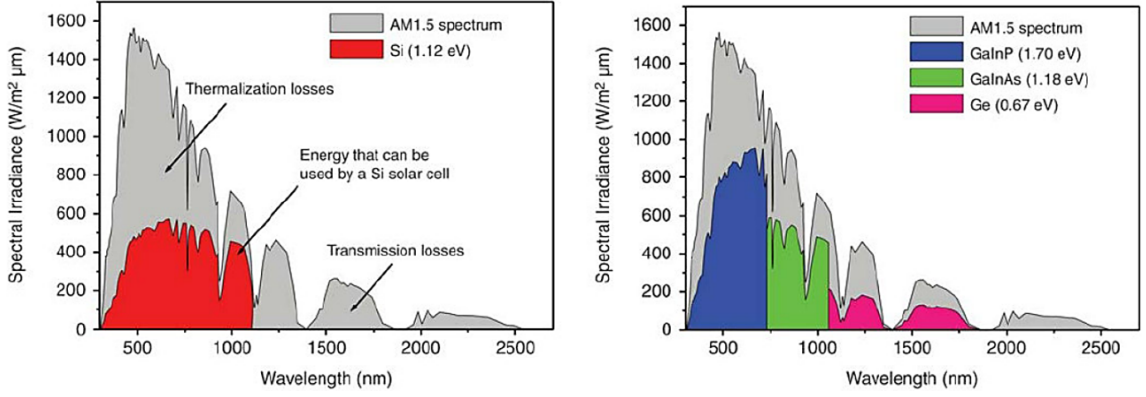


FIGURE 5.3 – Illustration de l'avantage des cellules MJ par rapport aux SJ [55] : les MJ permettent de convertir une plus large gamme de longueurs d'onde, et plus efficacement chacune grâce à l'ajustement des énergies de bandes interdites réduisant les pertes par thermalisation. En effet, pour un même photocourant, la puissance extraite sera supérieure pour une plus grande énergie de bande interdite (indiquée entre parenthèses en [eV]).

tunnel entre les cellules PV :

$$V_{oc} = \sum_{i=1}^{i=\# \text{jonctions}} V_{oc}(i) \quad (5.7)$$

$$I_L = \min(I_L(i)) \quad (5.8)$$

Le FF global est très proche de celui de la jonction limitatrice, comme l'illustre la Figure 5.4. La puissance de sortie suit alors la même expression que pour les mono-jonctions (eq. (5.3)).

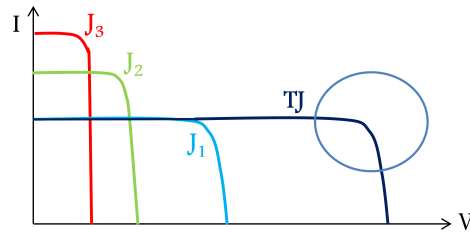


FIGURE 5.4 – Illustration du calcul du FF pour les cellules MJ. Le FF dépend des trois jonctions, il est donc nécessaire d'établir les 3 courbes IV des jonctions, de sorte à déterminer la courbe résultante de notre TJ. Remarquons que c'est principalement la cellule limitatrice (J_1 dans notre cas) qui définit le FF global. Par contre, plus les photocourants des différentes jonctions sont éloignés, plus le FF augmente.

C'est donc l'équation (5.8) qui cause la grande sensibilité des MJ, en limitant le courant total au plus petit des courants générés par les jonctions. Ainsi, si une jonction est dégradée pour une raison quelconque (vieillesse, contamination qui absorbe la lumière dans son spectre de conversion, etc.), c'est toute la MJ qui est impactée. La conclusion est la même pour une inhomogénéité d'intensité ou spectrale de la lumière atteignant la cellule : les photocourants locaux ne correspondent pas entre les cellules, induisant des pertes supplémentaires [56, 57].

5.2 Effets des conditions externes : taux de concentration, température, incidence

5.2.1 Evolution en fonction du taux de concentration

Bien que le modèle soit simplifié, il tient compte de l'évolution du rendement des cellules PV avec la concentration. En effet, la concentration de la lumière (supérieure à 1 soleil) permet d'atteindre des efficacités de conversion plus élevées [58]. Dans notre cas, il est donc important de le prendre aussi en compte.

Cette augmentation provient principalement de la dépendance de V_{oc} par rapport au photocourant et donc I_{cc} . Pour une concentration de $C\times$, suivant l'équation (5.5), on a

$$V_{oc}(C) = \frac{k_{Boltz}T}{q} \ln \left(\frac{CI_{cc}}{I_0} + 1 \right) \approx \frac{k_{Boltz}T}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} \right) + \ln C \right] = V_{oc}(1) + \frac{k_{Boltz}T}{q} \ln C \quad (5.9)$$

V_{oc} augmente donc logarithmiquement avec l'intensité lumineuse, et cette évolution est naturellement prise en compte dans notre modèle via l'équation de la tension en circuit ouvert.

5.2.2 Evolution selon la température

La dépendance avec la température est principalement dirigée par l'évolution des bandes interdites des cellules. Leur énergie (E_g) a en effet tendance à diminuer lorsque la température augmente, comme l'indique la formule suivante [59] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (5.10)$$

où $E_g(0)$, α et β sont des constantes du matériau, dont les principales sont reprises dans la Table 5.1. Ainsi, I_{cc} et I_0 augmentent avec la température puisque la bande interdite diminue, tandis que par conséquent V_{oc} et FF diminuent tous les deux. La variation dominante est celle de V_{oc} approximativement proportionnelle à T pour des températures modérées [60] (cf. équation (5.13) et (5.5)). Finalement, l'efficacité globale de la cellule diminue aussi pratiquement linéairement avec la température, pour un flux de lumière donné.

Matériau	Bande	$E_g(0)$ [eV]	α [eV/K]	β [K]
Si	X	1,1695	$4,73 \cdot 10^{-4}$	636
Ge	L	0,7437	$4,774 \cdot 10^{-4}$	235
GaAs	G	1,521	$5,58 \cdot 10^{-4}$	220
	X	1,981	$4,6 \cdot 10^{-4}$	204
InAs	G	0,420	$2,5 \cdot 10^{-4}$	75
	X	2,278	$5,78 \cdot 10^{-4}$	83
InP	G	1,421	$3,63 \cdot 10^{-4}$	162
	X	2,32	$7,66 \cdot 10^{-4}$	327
GaP	X	2,338	$5,771 \cdot 10^{-4}$	372
	G	2,88	$8 \cdot 10^{-4}$	300

TABLE 5.1 – Paramètres des matériaux de base [61] pour l'équation (5.10).

Pour les alliages $A_{1-x}B_x$, l'énergie de la bande interdite dépend des bandes interdites de ses constituants :

$$E_{g,X/L}^{AB} = E_{g,X/L}^A(1-x) + E_{g,X/L}^B x + C_{g,X/L}(1-x)x \quad (5.11)$$

$$E_g^{AB} = \min(E_{g,X}^{AB}, E_{g,L}^{AB}) \quad (5.12)$$

Les paramètres C_g d'intérêt pour nous sont repris dans la Table 5.2.

Matériau	$C_{g,L}$ [eV]	$C_{g,X}$ [eV]	C_g [eV]
InGaAs			-0,475
InGaP	-0,67	-0,17	

TABLE 5.2 – Paramètres des alliages [61] pour les équations (5.11) et (5.12).

A noter que le coefficient de température d'une cellule MJ est approximativement la somme des coefficients de température des mono-jonctions qui la composent [58] (cf. $V_{oc\ total} = \sum V_{oc}$).

Avec ces dépendances selon la température des bandes interdites, le modèle décrit de façon acceptable l'évolution des rendements des cellules selon cette température. Mais nous n'avons parlé que de la dépendance de V_{oc} avec la bande interdite. Il faut aussi noter que si celle-ci diminue, le photocourant augmente légèrement. Ceci ne compense pas la diminution de la tension, mais réduit un peu les pertes. Cet effet n'est pas pris en compte dans les simulations basées sur des EQEs réelles, qui sont donc un peu trop pessimistes à ce niveau.

5.2.3 Influence de l'angle d'incidence

Le modèle présenté ne prend pas en compte l'évolution de l'efficacité de la cellule PV selon l'ouverture angulaire de la lumière l'atteignant. Deux problèmes apparaissent lors d'une incidence avec une ouverture angulaire non-nulle : (1) le revêtement réfléchit la lumière différemment selon l'angle d'incidence, et (2) la cellule doit être plus épaisse pour un cône angulaire d'acceptance plus grand de sorte à conserver la même efficacité de collection des photons. Les cellules PV nous concernant faisant plusieurs microns d'épaisseur, le second problème devient presque négligeable, les structures pour emprisonner la lumière étant efficaces pour un angle d'acceptance jusqu'à presque 90° [18]. Quant au revêtement, il faudra y faire attention, mais dans nos simulations, nous ne considérerons pas ce point, les revêtements sont par hypothèse homogènes angulairement, et compris dans les EQEs des cellules PV.

5.3 Hypothèses pour le calcul des puissances électriques

5.3.1 Lumière incidente

La distribution en puissance et spectrale (soit $E(\lambda)$ dans l'équation (5.1)) parvenant sur les cellules PV est calculée par un programme Matlab® [62] réalisé dans le cadre de cette thèse. Celui-ci est basé sur le *raytracing*, et prend en compte le spectre du soleil, les effets du réseau de diffraction, de la lentille de Fresnel, ainsi que les pertes optiques

qu'ils engendrent (réflexions, absorption, ombrage, etc.). Nous reparlerons des méthodes de simulations notamment en section 10.2.

5.3.2 EQEs réelles et idéales

Deux types d'EQEs seront utilisés : les EQEs réelles, tirées de la littérature et présentées en section 5.4, et des EQEs idéales, utiles pour les optimisations.

Les EQEs réelles sont issues de mesures expérimentales, et font donc intervenir tous les facteurs de pertes d'une cellule PV : la réflexion, l'absorption non-idéale, l'ombrage, les pertes internes, etc.

Le terme d'EQE idéale correspond à une conversion parfaite de tout photon d'énergie supérieure à la bande interdite de la cellule. Elle vaut donc 100% pour des longueurs d'onde inférieures à $\lambda = h_{\text{Planck}} \cdot c / E_g$, et 0 pour les longueurs d'onde supérieures.

5.3.3 Expressions empiriques

La puissance de sortie calculée selon l'équation (5.3) nécessite les expressions du photocourant, déjà défini en équation (5.1), du courant de saturation et du FF. Pour ces deux derniers, nous avons choisi de travailler avec des expressions semi-empiriques de sorte à modérer l'idéalisation de notre modèle [52]. Leurs expressions sont reprises en équations (5.13) et (5.14). Les valeurs des énergies des bandes-interdites E_g sont tirées de caractéristiques réalistes des matériaux [63].

$$I_0 = 1,5 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(\frac{-q \cdot E_g}{k_{\text{Boltz}} T}\right) \quad \left[\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}\right] \quad (5.13)$$

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \quad (5.14)$$

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{k_{\text{Boltz}} T / q} \quad (5.15)$$

5.4 Détails des cellules utilisées

Le modèle étant un peu idéalisé, nous avons vérifié pour chaque cellule utilisée les résultats et les paramètres en comparaison avec des valeurs empiriques de la littérature. Les conditions de mesures ne sont pas les mêmes, mais cela nous permettra de cadrer les méthodes et d'avoir confiance dans l'ordre de grandeur des résultats par la suite. Rappelons que l'objectif n'est pas de simuler parfaitement les performances électriques (auquel cas il faudrait établir des hypothèses exactes sur les cellules PV, y compris les résistances et pertes internes, ce qui outrepasserait le cadre de cette thèse d'optique), mais simplement d'avoir un modèle cohérent, permettant de situer les performances attendues de notre concentrateur et de les comparer, avec les mêmes modèles de simulation, aux performances de systèmes classiques.

Cellules mono-jonction

Les cellules SJ qui seront employées sont les suivantes : GaAs, Si, InGaP, InGaAs et Ge. Le modèle a donc été vérifié pour ces cellules en particulier. Etant donné que les cellules SJ sont devenues obsolètes pour les applications spatiales comprenant des panneaux solaires

plans, nous avons utilisé des données terrestres. Les EQEs sont reprises en Figure 5.5, et les résultats dans la Table 5.3, à chaque fois avec la référence donnant des résultats expérimentaux. On observe que les rendements sont assez proches entre nos simulations et les résultats expérimentaux. Evidemment, l'idéalité de notre modèle mène à une légère surévaluation, mais dans l'ensemble, cela reste cohérent.

	J_{cc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF [%]	η [%]	Erreur [%]
GaAs - spectre AM1.5 (1000W/m ²), à 20°C.					
Réf. [18]	29.7	1038.9	84.7	26.14	
Simulation	30	1035.9	85.94	26.9	< 103%
Ge - spectre AM1.5 1000W/m ² , à 25°C					
Réf. [18]	43.2	263.1	69.63	7.89	
Simulation	42.5	266.8	70.07	7.94	< 101%
$In_{0.575}Ga_{0.425}P$, AM1.5, 25°C (n=1.3), EQE [64]					
Réf. [18]	14.4	1390	86.9	17.4	
Simulation	14.2	1388	88.85	17.48	< 100.5%
Réf. [65]	13.5	1370	88	16.4	
Simulation	13.8	1350	88.76	16.6	< 101.5%
InGaAs - AM0, 25°C. (n = 1.47), EQE [66]					
Réf. [67]	64.5	385	72	12.5	
Simulation	62.2	365	68	11.65	~ 93%
Si mono-jonction à 25°C. (n=1.34), EQE [68]					
Réf. [69]	40	727	81.2	23.6	
Simulation	39.5	735.7	81.69	23.85	~ 101%

TABLE 5.3 – Comparaison des résultats pour les mono-jonctions qui seront utilisées dans la suite. Les facteurs d'erreurs approximatifs sont aussi repris, illustrant la proximité des résultats avec les mesures réelles.

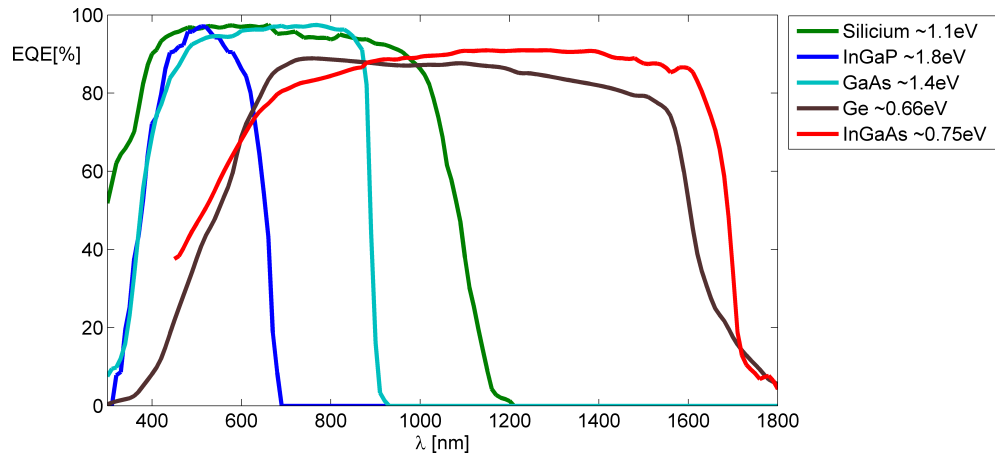


FIGURE 5.5 – EQEs des SJ utilisées. Les courbes proviennent des références citées dans la Table 5.3.

Cellule triple-jonctions

La cellule TJ que l'on va utiliser dans les simulations est une cellule InGaP/GaAs/Ge de chez Emcore [70]. Les EQEs sont reprises en Figure 5.6. Les résultats pour vérification sont repris dans la Table 5.4 : on observe que les résultats simulés sont au-dessus des mesures, principalement à cause du FF. Celui-ci est en effet difficile à estimer, d'autant plus pour les MJ où les effets d'interface notamment ne sont pas pris en compte dans la simulation. Ainsi, pour les résultats à venir, un facteur d'idéalité est ajouté aux résultats : ils sont multipliés par le rapport des FF, soit 84/88. Le résultat dans ce cas-ci donne alors $\eta = 28.93\%$, ce qui est bien plus proche des mesures.

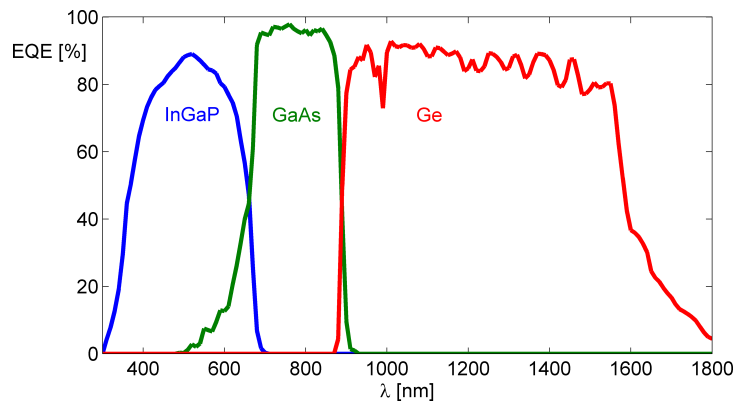


FIGURE 5.6 – EQEs de la MJ utilisée. Les courbes proviennent de la référence [70], et correspondent à la cellule ATJ.

	V_{oc} [mV]	I_{sc} [mA/cm ²]	FF[%]	η [%]
Réf. [70]	2650	17.3	84	28.5
Simulation	2650	17.55	88	30.45

TABLE 5.4 – Comparaison des résultats de MJ en conditions standards entre la littérature [70] et la simulation. 28°C, AM0.

Si l'on compare avec d'autres données, les simulations donnent une efficacité de 28.93% à 28°C, et 24.92% à 80°C, tandis que dans la littérature, on trouve des données entre 26.8 et 29.5% à 28°C, et de 24 à 26.3% à 80°C pour les cellules PV actuelles de chez AzurSpace ou Spectrolab. Les rendements calculés se situent donc effectivement dans les intervalles expérimentaux.

Cellule double-jonctions

Pour les DJ, nous avons simplement repris les EQEs des cellules TJ (Figure 5.6), en supprimant la troisième jonction. En gardant le facteur d'idéalité (84/88), on obtient des efficacités de l'ordre de 26.2% à 28°C (sous AM0), contre 26.9% dans la littérature [71]. Etant donné que les jonctions utilisées et les EQEs ne sont pas exactement les mêmes (InGaP avec un énergie de bande interdite de 1.81 eV au lieu de 1.88 eV pour la DJ réf. [71]), ces résultats sont assez proches.

Chapitre 6

Environnement spatial

L'environnement spatial est un élément très contraignant lors de la conception des satellites, et notamment par rapport au rendement des cellules PV. Ce chapitre décrit les différents aspects importants pour nous, notamment les caractéristiques du spectre solaire, l'environnement radiatif et le vide spatial. Pour notre cas d'étude, nous prenons l'hypothèse d'une orbite géostationnaire, orbite la plus fréquente pour un très grand nombre de satellites, comme les satellites de télécommunication. Bien sûr, les conditions peuvent être adaptées à n'importe quelle orbite, même dans le cadre de missions scientifiques particulières.

6.1 Spectre solaire AM0

Etant donné que le concentrateur se destine aux applications spatiales, le spectre du soleil est le spectre AM0, dont les données proviennent du spectre de référence « ASTM G-173 » [72]. La répartition spectrale est présentée dans la Figure 6.1.

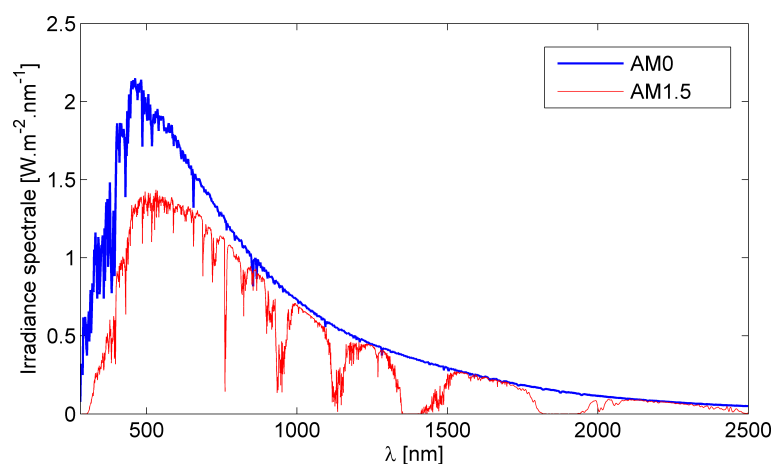


FIGURE 6.1 – Simulation du spectre AM0 selon les données de la référence [72]. Le spectre au niveau de la Terre (AM1.5) est aussi tracé, illustrant l'absorption notamment des UVs par l'atmosphère.

Comparativement au spectre terrestre, le spectre AM0 contient beaucoup plus de lumière dans les ultraviolets (UV). Puisque ces UV en particulier ne sont présents que dans

le vide, ils sont souvent dénommés « VUV » pour « Vacuum UltraViolet ». Ces VUVs ne sont pas sans importance, comme nous l'aborderons au point 6.4.

L'ouverture angulaire du soleil perçue au niveau de notre concentrateur est proche de celle vue de la Terre. Elle est donc posée à $\pm 0.26^\circ$, et notée par la suite θ_{sun} .

6.2 Radiations

La Terre est entourée de « ceintures de radiations de Van Allen » formées à cause de son champ magnétique et principalement composées d'électrons et de protons à haute énergie. Elles sont schématisées dans la Figure 6.2, ainsi que notamment l'intersection avec l'orbite géostationnaire (GEO). Ces électrons et protons sont capables d'endommager la majorité des matériaux, notamment les cellules PV : les radiations ont pour effet de créer des défauts dans le matériau et de réduire le temps de vie des porteurs, ce qui réduit aussi le rendement de la cellule. Les dommages dépendent de l'énergie des radiations et de la durée de l'exposition. Un des aspects principaux est donc l'orbite. L'orbite GEO est située

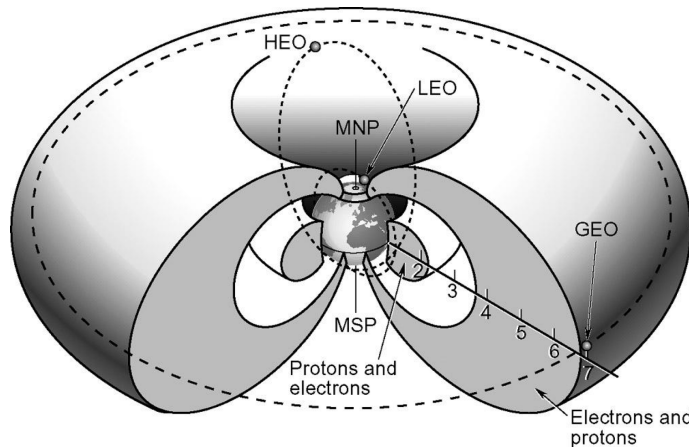


FIGURE 6.2 – Ceintures de radiations autour de la Terre [73].

dans la zone extrême des ceintures de Van Allen, et rencontre donc de larges doses de radiations. Dans ce cas, les doses typiques des satellites en fin de vie (après environ 15 ans de mission pour les satellites de télécommunication) sont reprises dans la Table 6.1. Leur effet est important, et lors du dimensionnement d'un panneau solaire, c'est la puissance attendue en fin de vie qui est considérée. Chaque cellule a dès lors un facteur de perte associé à la dose reçue en fin de mission, souvent expérimental car la simulation de l'effet des radiations est très/trop complexe. Pour une cellule MJ par exemple, P_{EOL}/P_0 vaut 0.89, avec un flux de $5 \cdot 10^{14}$ e/cm² d'électrons à 1 MeV [74].

Type de radiation	Energie	Flux
e ⁻	1 MeV	$10^{14} \rightarrow 10^{15}$ e/cm ²
p ⁺	100 keV	$10^{10} \rightarrow 10^{11}$ p/cm ²

TABLE 6.1 – Radiations typiques EOL pour une orbite GEO.

6.3 Vide spatial

En orbite géostationnaire règne une pression de 10^{-13} à 10^{-17} mbar, soit un ultra-vide. L'absence d'atmosphère a deux conséquences principales [75] :

(1) Absence de convection

L'absence de gaz se traduit par l'absence de convection et de conduction gazeuse, les deux modes principaux de transfert de chaleur sur Terre. Seuls les modes conductifs au sein même du satellite et les modes radiatifs existent dans l'espace. Ceci réduit largement la capacité des éléments à évacuer la chaleur, notamment les cellules solaires. Cet aspect est abordé plus largement au chapitre suivant (Chapitre 7).

(2) Dégazage et contamination

La dépressurisation lors du lancement et ensuite le dégazage dans le vide produisent un nuage de contaminants potentiels autour du satellite. La majorité du dégazage a lieu durant la première année de vol, mais le phénomène est lent et continue pendant des années encore. Les contaminants peuvent être de nature très diverses, depuis les matériaux organiques comme le mylar, téflon, kapton, colles, ... intervenant un peu partout sur le satellite, mais aussi les lubrifiants, produits de nettoyage, produits adsorbés par les matériaux poreux (eau, solvants de nettoyage, ...), éléments intervenant dans la construction du satellite, etc. Chaque type de contaminants a sa propre courbe d'absorption lumineuse en fonction de la longueur d'onde, et une fois déposés sur les surfaces optiques ou cellules PV, ils modifient le spectre transmis et finalement réduisent les performances. Ceci est d'autant plus critique sous l'effet des UV, décrit dans la section suivante.

6.4 Irradiation dans l'ultraviolet

La présence non-négligeable d'UV dans le spectre AM0 donne lieu à certains phénomènes pouvant dégrader notamment notre concentrateur. Les effets principaux sont détaillés ci-dessous.

Jaunissement

Dans l'espace, les UV sont très présents (pas de protection de l'atmosphère). Les photons de cette gamme sont très énergétiques et sont connus pour dégrader les matériaux. Au niveau des matériaux polymères, ces VUVs ont la capacité de casser des liens interatomiques et de modifier la structure des molécules polymères, notamment en les allongeant. Cependant, ces molécules modifiées possèdent généralement des bandes d'absorption dans le visible, ce qui augmente l'absorption solaire et induit un « jaunissement » du matériau [73, 76]. C'est notamment le cas du silicone [77, 78, 79, 80], comme l'illustre la Figure 6.3.

Pour contrer cet effet, des revêtements anti-UV sont utilisés (voir section 8.3), mais ils ne sont pas parfaits, et un jaunissement est toujours à prendre en compte. Ceci réduit l'efficacité du système en fin de vie, principalement avec les cellules MJ : sans protection, près de 30% de pertes sont possibles après 15 ans, réduites à 3% avec un revêtement adapté. C'est un des aspects qui devrait être moins contraignant avec notre concentrateur basé uniquement sur des cellules SJ, nous l'aborderons en section 15.2.1 (a).

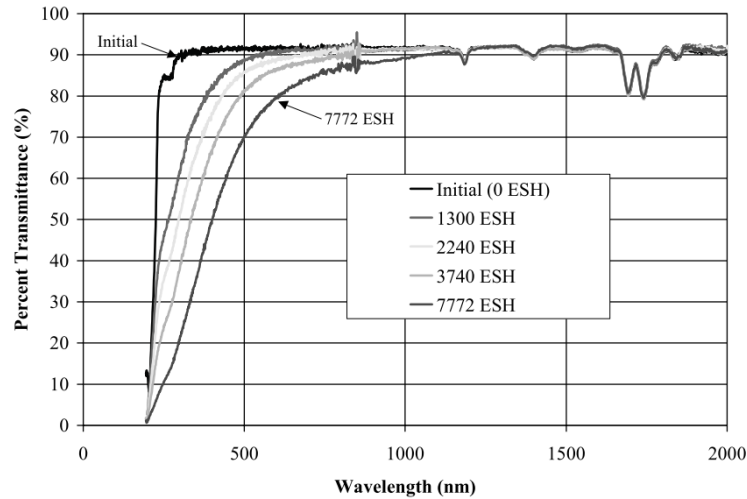


FIGURE 6.3 – Effet d’une exposition aux UVs sur la transmittance d’un film de silicone DC93-500 [78]. Les différentes courbes correspondent à différents niveaux d’exposition aux UV, calculés en termes d’« Equivalent Sun Hours » (ESH).

Fragilisation

Ces radiations peuvent aussi causer des dégradations des propriétés mécaniques du silicone telle la diminution de son élongation maximale avant fissure. Cet aspect est donc à surveiller [77].

Fixation et coloration des contaminants

Un effet annexe de la présence de VUV est la fixation de contaminants notamment sur les lentilles ou les cellules PV. En effet, le plus grand problème des contaminants est leur combinaison avec une illumination UV : les UV vont initier un processus de polymérisation/« cracking » qui va lier le contaminant à la surface. Ces contaminants sont alors qualifiés de « photo-fixés » et ne peuvent plus se désorber. En plus de fixer le contaminant sur la surface, les UV causent son noircissement au cours du temps (en combinaison avec les autres radiations présentes), accentuant l’absorption d’une partie du spectre par cette couche de contaminant [81, 82]. C’est ce phénomène qu’illustre par exemple la Figure 6.4.

Suite à cette modification du spectre transmis et absorption de la lumière par exemple au niveau des cellules PV, le rendement global de celles-ci sera réduit, d’autant plus si l’on utilise des cellules MJ [83]. De nombreux satellites ont mis en évidence ce phénomène [82, 84], avec un exemple en Figure 6.5 où après 7 ans, la contamination seule a causé près de 10% de pertes supplémentaires. Un exemple des coefficients d’absorption de contaminants photo-fixés représentatifs est repris en Figure 6.6, correspondant aux matériaux après 15 ans d’exposition aux radiations (valeurs comprenant le noircissement avec le temps).

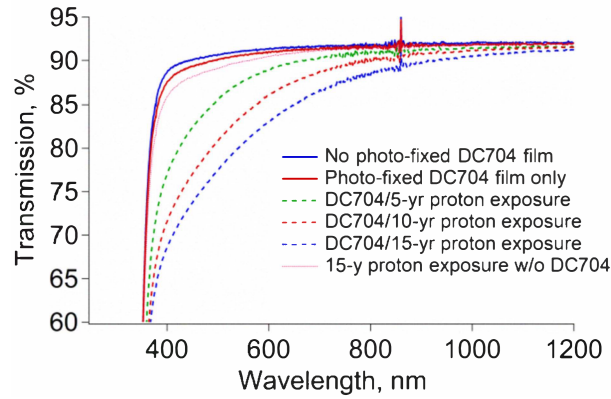


FIGURE 6.4 – Mesure de l'évolution de la dégradation en transmission d'un échantillon de verre protecteur depuis l'état sans contamination (pré-test), avec contamination (DC704 photo-fixé), et en combinaison avec une exposition aux protons. L'épaisseur du film de DC704 est estimée à environ 30 nm par ellipsométrie [81].

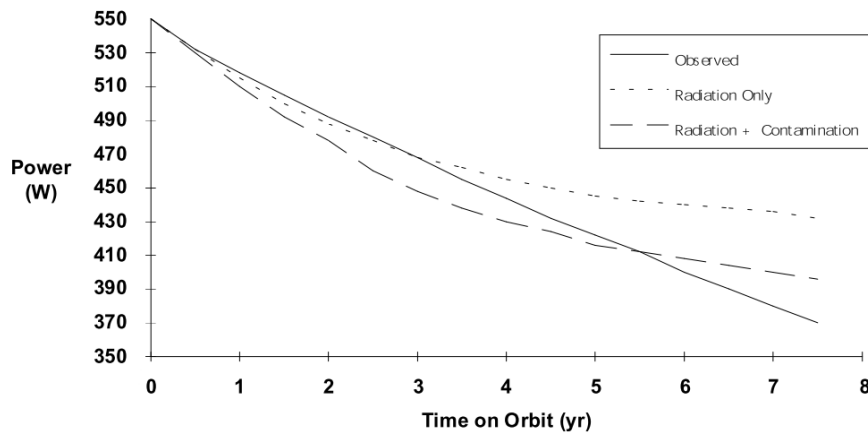


FIGURE 6.5 – Preuve de la contamination des panneaux solaires du satellite GPS Block I [82].

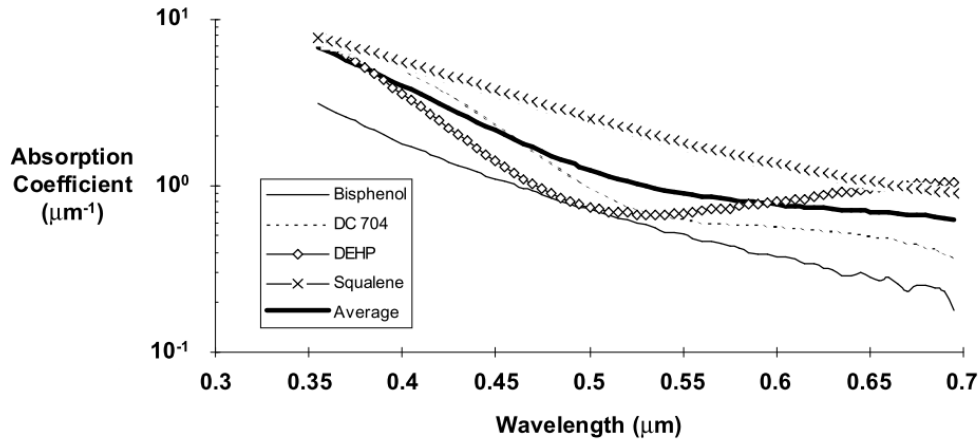


FIGURE 6.6 – Profils d’absorption de films photo-fixés [82]. DEHP est le contaminant le plus critique, il est représentatif des composants plastiques qui dégazent à partir de polyestères et uréthanes utilisés dans la construction des satellites [83]. Le DC704 représente les contaminants siliconés, provenant d’adhésifs à base de silicone utilisés pour coller les composants des satellites [81].

6.5 Conclusions

Dans ce chapitre, les différents aspects importants de l’influence de l’environnement spatial sur notre concentrateur ont été décrits. Ils reprenaient les points suivants :

- le spectre solaire, nécessaire pour toutes les simulations,
- l’environnement radiatif, un des facteurs principaux de dégradation des cellules PV,
- les conséquences du vide spatial notamment point de vue thermique et contamination,
- les effets de la lumière UV, incluant le jaunissement du silicone et la fixation de contaminants.

Le spectre solaire définit la répartition de la lumière selon les longueurs d’onde, modifiant par exemple la configuration optimale des cellules MJ entre une application terrestre et spatiale. Il sera utilisé pour toutes nos simulations.

L’environnement radiatif, la contamination et le jaunissement sous illumination UV causent des dégradations à la fois aux cellules PV, mais aussi en modifiant le contenu spectral qu’elles reçoivent. Ces dégradations sont particulièrement marquées pour des cellules MJ. La réduction de la sensibilité à ces dégradations est un des objectifs de notre concentrateur, et la raison du choix de la séparation spectrale. L’avantage de notre concentrateur à ce propos sera décrit en section 15.2.

Quant aux aspects thermiques, ils seront abordés plus amplement dans le chapitre suivant, et permettront par la suite de déterminer la viabilité thermique du concentrateur, ainsi que d’estimer la température de fonctionnement attendue des cellules PV.

Chapitre 7

Environnement thermique et principes de simulation

Comme évoqué au point 6.3, dans l'espace, il n'y a pas de convection. Ce dernier est cependant le mode de transfert de chaleur le plus efficace sur Terre. Ici, ce sont la conduction dans les matériaux et la radiation vers l'espace froid qui dominent. On voit donc facilement l'apparition de « points chauds » sur les cellules PV. Or l'efficacité des cellules PV diminue lorsque la température augmente, comme expliqué en section 5.2.2... De plus, si la température devient trop importante, des dégâts irréversibles peuvent apparaître. Notons que des problèmes peuvent aussi apparaître à basse température, en particulier en régime d'opération à basse intensité et basse température (Annexe A) [85, 86]. L'environnement thermique est donc un élément critique dans la conception, nécessitant des simulations thermiques pour vérifier la viabilité du système. Après un bref rappel de l'environnement thermique perçu par notre panneau solaire, les principes utilisés pour les simulations thermiques et le choix du panneau solaire seront présentés.

7.1 Environnement thermique

Nous prenons comme référence une orbite géostationnaire, habituelle pour les satellites de télécommunication. Sur cette orbite, nous avons donc comme environnement thermique majoritairement le soleil avec un spectre AM0 [72], donnant $\sim 1335 \text{ W/m}^2$. On peut aussi considérer l'albédo (lumière du soleil réfléchi par la Terre) et l'IR terrestre (lumière du soleil absorbée par la Terre et réémise comme énergie IR), vus principalement par la face arrière du panneau. Très faibles, ces flux sont en général considérés comme négligeables, comme suggéré par la Figure 7.1. Ils sont en effet de l'ordre de 5 à 7 W/m^2 pour l'orbite considérée [88], c.-à-d. qu'ils représentent moins de 0.5% d'une constante solaire.

Cependant, ces apports supplémentaires de chaleur sur la face arrière du panneau jouent légèrement sur les températures des cellules PV, selon les propriétés choisies de la face arrière. Ainsi, pour une surface peu absorbante ($\alpha = 0.2$), on obtient une différence de moins de 0.2°C , et jusqu'à 0.7°C pour une surface noire (kapton noir par exemple, $\alpha = 0.9$). Bien que cette différence de température soit faible en comparaison avec les imprécisions sur le modèle et le choix des caractéristiques des matériaux, elle n'en est pas pour autant totalement négligeable et l'albédo et l'IR terrestre sont donc intégrés aux calculs.

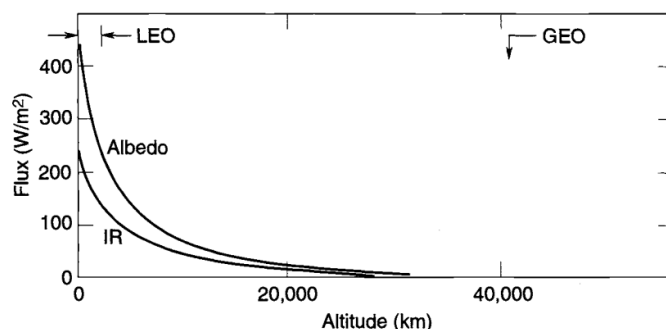


FIGURE 7.1 – Flux de chaleur provenant de la Terre en fonction de l'altitude [87] : pour une orbite GEO, l'albédo et l'IR terrestre sont presque négligeables.

7.2 Sélection d'un panneau solaire

Le choix du type de structure de panneau solaire est important, et détermine en grande partie les températures à l'équilibre thermique. Puisqu'il n'y a pas de convection, c'est principalement la conduction dans le panneau qui va permettre d'éviter l'apparition de points chauds. C'est d'autant plus important dans le cas de la concentration solaire. Nous nous sommes donc dirigés vers un panneau à haute conductivité thermique, développé à l'origine pour le satellite MESSENGER.

MESSENGER est un satellite conçu pour une mission à proximité de Mercure [89]. Beaucoup plus proches du soleil que la Terre, les panneaux reçoivent près de 11 flux solaires. Ceci peut faire monter la température du satellite jusqu'à plus de 370°C . Or il a été vu dans le Chapitre 5 qu'une augmentation de la température réduit le rendement de conversion des cellules solaires. En l'occurrence, des pertes de l'ordre de 20% en un mois sont à attendre pour les 11 constantes solaires à la fois à cause de la température et de la dégradation due aux radiations et UV. Des solutions ont donc été trouvées pour contrôler la température du système.

Au niveau des panneaux solaires, deux solutions ont été mises en place. En premier lieu, une rotation du panneau par rapport au soleil permet de contrôler la relation entre puissance requise stricte et température du panneau. Ensuite, des miroirs ont été insérés entre les cellules photovoltaïques, avec 1/3 de cellules photovoltaïques pour 2/3 de miroirs. Ces derniers réfléchissent l'énergie solaire non-utile de sorte à garder le panneau plus froid. Ceci génère cependant des différences de température entre les zones avec et sans cellules. Le panneau solaire en tant que tel a donc aussi été optimisé pour favoriser la conduction de la chaleur des zones chaudes vers les zones plus froides : c'est un panneau à haute conduction, contenant des fibres à haute conductivité, de telle sorte que la chaleur se répartisse au mieux le long du panneau.

Ce panneau possède donc en alternance des zones de cellules PV recevant 11 constantes solaires, et des zones protégées couvertes de miroirs réfléchissant presque tout le flux incident. Cette configuration est proche de celle d'un panneau solaire en orbite autour de la Terre possédant un système de concentration solaire autour de $11\times$. Ceci se rapprochant de notre situation, c'est naturellement que nous nous sommes aussi dirigés vers ce type de panneaux à haute conductivité pour notre projet. La seule différence se situe au niveau

des miroirs : ils ne sont pas nécessaires ici puisque très peu de lumière atteint cette zone. Dès lors, pour éviter leur masse supplémentaire, nous avons simplement opté pour un revêtement clair, avec une émissivité élevée. Par exemple, de la peinture blanche, suffisante pour éviter l'absorption de la lumière « parasite » qui atteindrait ces zones.

Le panneau choisi et utilisé pour les simulations est donc composé dans ses grandes lignes par un panneau en nid d'abeille aluminium, couvert d'un couche en « Carbon Fiber Reinforced Polymer » (CFRP) à haute conductivité. Les cellules sont isolées du panneau par une couche de kapton et collées avec une colle à haute conductivité thermique. Finalement, les zones entre les cellules sont peintes en blanc. Les détails des éléments, leurs épaisseurs et leurs caractéristiques thermiques sont repris en [Annexe D](#).

A noter qu'il existe de nombreuses solutions pour les panneaux solaires : les conductivités du CFRP et du nid d'abeille sont ajustables, le nid d'abeille peut être rempli d'une mousse conductrice, une plaque conductrice peut être ajoutée sous les cellules pour homogénéiser leur température, d'autres types de panneaux peuvent être envisagés comme les panneaux flexibles tout en aluminium ou en graphène [90], le matériau de revêtement entre les cellules peut être des miroirs, du kapton, de la peinture, etc. Les résultats de température dépendront donc fortement des caractéristiques du panneau utilisé. Le but n'est cependant pas ici de déterminer la température attendue en mission de notre concentrateur, mais simplement d'utiliser un panneau plausible, simulé selon un modèle simple, qui nous servira de base de comparaison entre les configurations présentées par la suite. Bien sûr, l'écart de température entre les configurations dépend aussi du panneau choisi. Pour ces simulations, la référence choisie par héritage est le panneau de MESSENGER.

7.3 Principe des simulations thermiques

Les bases des simulations thermiques sont largement définies dans de nombreuses références [75, 91]. Ne seront donc rappelées que les équations et notions effectivement utilisées pour nos simulations thermiques. Dans notre cas, les échanges thermiques sont de deux types : radiatif et conductif. Un schéma de ces échanges thermiques est repris en [Figure 7.2](#).

7.3.1 Schéma thermique

Pour les simulations thermiques complexes, un parallèle avec les circuits électriques peut être établi aisément. Ainsi, en chaque point de la géométrie à tester, on place un « noeud », et entre ces noeuds, des résistances décrivent la conduction entre eux ($1/GL$) et les effets radiatifs ($1/GR$). Le courant est ici un flux de chaleur q . Etant donné que nous nous situons dans l'espace, le schéma est simplifié par l'absence de convection. L'ensemble du schéma suit alors les lois d'Ohm, exactement comme un circuit électrique. Les expressions de ces résistances équivalentes sont reprises en [Annexe E](#), ainsi que la méthode de calcul des températures.

Les paramètres nécessaires pour décrire les liens conductifs sont les coefficients de conductivité thermique, les épaisseurs des matériaux et les sections couvertes par chaque noeud. Les liens radiatifs dépendent de l'émissivité du matériau et des facteurs de vue entre tous les noeuds.

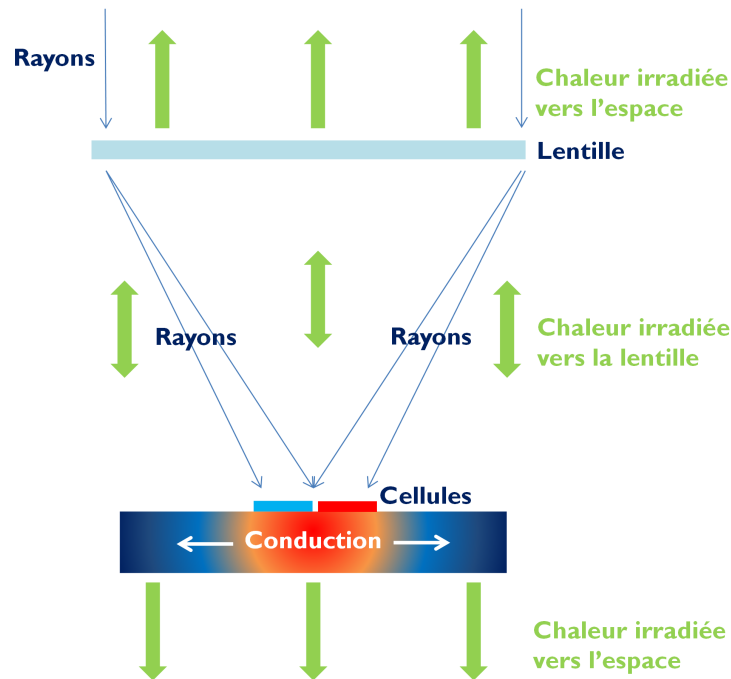


FIGURE 7.2 – Schéma des échanges thermiques pour notre panneau : les transferts de chaleur s'effectuent uniquement par conduction dans le panneau et via des échanges radiatifs avec l'environnement froid. Le schéma n'est pas à l'échelle.

Un exemple de schéma thermique pour un module du panneau (répétable à l'infini), est repris en Figure 7.3. Celui-ci est adaptable à toute configuration des cellules et lentille. En pratique, nous avons positionné près de 10 points par cellule, et plus de 50 sur les zones intermédiaires.

En incluant les conditions d'entrées en termes de flux parvenant en chaque point, et en appliquant l'équilibre thermique, nous sommes alors en mesure d'estimer la température théorique du panneau, dans les limites des hypothèses que nous nous sommes imposées.

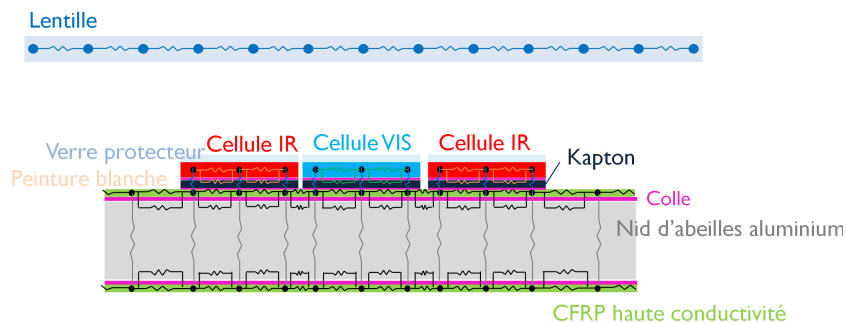


FIGURE 7.3 – Exemple de schéma thermique simplifié utilisé pour décrire un module du panneau solaire. Le schéma n'est pas à l'échelle.

7.3.2 ESATAN®

Concrètement, nous utilisons le programme de simulation thermique ESATAN® [92], spécialisé pour les conditions spatiales. Il nécessite l'introduction du schéma de noeuds décrivant la géométrie du problème, la valeur des liens de conduction GL entre tous les points, les propriétés d'émissivité des matériaux pour le calcul des liens radiatifs GR, et le fichier des conditions d'entrée reprenant les flux absorbés au niveau de chaque noeud. Tous ces fichiers sont réalisés dans Matlab®, sur base des programmes développés pour notre concept de concentrateur. ESATAN® est alors capable de calculer les liens radiatifs entre les noeuds, et finalement la température à l'équilibre de chaque noeud de l'élément simulé. Notons que pour chaque simulation, le terme d'erreur sur le bilan thermique global basé sur la conservation d'énergie est inférieur à 10^{-6} . La discrétisation du panneau et des cellules a fait l'objet d'études de convergence de sorte à représenter de façon suffisamment fidèle la répartition de la température finale.

Point de vue géométrique, nous simulons un panneau et une combinaison réseau/lentille infinis. Pour simplifier et raccourcir les calculs, un seul module est décrit explicitement. La dimension infinie du panneau est simulée par des miroirs IR parfaits (pour les aspects radiations), et les noeuds de droite du module sont reliés à ceux de gauche pour garder la continuité de la conduction interne. Dans les cas non-symétriques, seule la direction cylindrique peut être simulée de cette façon, l'autre axe transverse devant être simulé par un panneau le plus long possible pour atteindre une convergence.

Un panneau infini, sans montants, nous donnera donc une température maximale atteinte par les cellules PV. Des simulations plus précises sont évidemment possibles, mais nécessitent de nombreuses hypothèses sur les jonctions entre éléments, les systèmes de déploiement, les dimensions exactes du panneau, etc. ce qui n'est pas nécessaire à notre niveau : le but est simplement de déterminer l'ordre de grandeur de la température maximale que pourraient atteindre les cellules PV en fonctionnement, de sorte à pouvoir se prononcer sur la viabilité thermique du concentrateur proposé.

7.4 Conclusions

L'environnement thermique dans l'espace n'est pas particulièrement favorable à la concentration solaire. Pour conserver une température acceptable au niveau des cellules solaires, il est donc nécessaire d'utiliser un panneau solaire adéquat, favorisant la conduction interne et les échanges radiatifs avec l'environnement froid de sorte à éviter l'apparition de points chauds et la dégradation des cellules PV. Le panneau choisi et décrit dans ce chapitre répond à ces demandes : c'est un panneau à haute conductivité, développé pour la missions MESSENGER et adapté à notre contexte. Le principe des simulations thermiques a aussi été explicité. La structure du panneau, les propriétés de ses matériaux, ainsi que les données de flux reçus en chaque point calculées par nos programmes Matlab® permettent à ESATAN® d'estimer la température du système complet à l'équilibre. Bien que le panneau simulé soit infini et donc les températures plus élevées qu'en réalité, c'est un bon compromis pour estimer un ordre de grandeur de la température maximale au niveau des cellules et comparer différentes configurations de concentrateurs.

Ces données seront utilisées au Chapitre 11 pour estimer les températures des cellules PV, nécessaires pour conclure sur la viabilité thermique du concept, ainsi que pour les calculs des performances électriques.

PARTIE III

Développements optiques et analyse du concept

Cette troisième partie est consacrée à la réflexion menée à propos de notre concentrateur avec séparation spectrale, introduit dans le Chapitre 3, ainsi qu'aux divers développements et améliorations que nous y avons apportés. En premier lieu, nous définirons les caractéristiques et les raisons du choix du matériau de base. Ensuite, nous détaillerons les types de réseaux de diffraction les plus adaptés en association avec la combinaison la plus optimale de cellules PV, moyennant certaines hypothèses sur un système idéal. Ces hypothèses seront levées par l'introduction des effets géométriques réels de l'élément optique, dont les méthodes de développement et d'optimisation optique complète seront détaillées pour chaque configuration proposée. Une fois les configurations choisies et optimisées, nous obtiendrons des résultats en termes de performances électriques, combinés aux résultats thermiques. Ces données permettront d'établir une comparaison entre les résultats attendus de notre concentrateur à séparation spectrale par rapport à un panneau plan ou un concentrateur classique utilisant des cellules MJ. Une étude de tolérancement et des potentielles pertes optiques, ainsi que la proposition de systèmes de déploiement et un bilan de masse complèteront le travail théorique. Celui-ci se conclura sur le bilan des avantages de la concentration solaire couplée à la séparation spectrale de notre concept. En termes de perspectives et pour illustrer la flexibilité des concepts engagés dans notre concentrateur, des utilisations détournées/modifiées de celui-ci seront décrites en fin de partie. Le détail du cheminement de cette partie est repris dans le diagramme au verso.

[8] Choix du matériau

[9] Choix des réseaux et des cellules PV

Choix des réseaux : blazé et lamellaire

Méthode pour le choix des cellules PV et λ_{blaze}

Performances idéales et conclusions

**Séparation
spectrale**

[10] Développements et modélisation du concept optique

Contraintes sur la période

Développement des configurations blazée et lamellaire

→ Méthode pour l'établissement des paramètres optimaux

**+ aspects
géométriques**

Itérations

[11] Simulations thermiques

[12] Performances → EQEs idéales

→ EQEs réelles

Etablissement des paramètres optimaux

Résultats optiques et électriques

Comparaison avec des panneaux plans et concentrateurs sans séparation spectrale

[13] Sensibilité et pertes optiques

[14] Déploiement et bilan de masse

[15] Avantages de la concentration couplée à la séparation spectrale

[16] Exemples d'adaptations à d'autres contextes

Chapitre 8

Choix du matériau optique : Silicone DC93-500

Le choix du matériau pour la réalisation de notre concentrateur est un paramètre important, puisqu'il va déterminer à la fois le comportement optique du concentrateur (au travers de son indice de réfraction), mais aussi la viabilité de l'élément optique vis-à-vis de l'environnement spatial, ainsi qu'une partie de la masse globale. Ces éléments ont été pris en compte lors du choix du matériau. Notons cependant que tout le développement optique en tant que tel ne dépend que de l'indice de réfraction, et que les méthodes et concepts développés sont donc adaptables à tout matériau transparent qui pourrait paraître adéquat par la suite ou selon l'utilisation que l'on veut en faire (application terrestre par exemple). J'aborderai donc ici les raisons qui ont dirigé notre choix vers le silicone DC93-500 pour notre application en particulier, ainsi que ses caractéristiques principales et les limites de ce matériau.

8.1 Pourquoi le silicone DC93-500 ?

Le concentrateur étant développé à l'origine pour une application spatiale, le matériau doit donc être compatible avec les contraintes de l'espace en partie mentionnées en section 6.

Le silicone DC93-500 semble alors un excellent candidat : il possède une faible densité (1.08 g/cm^3), est opérationnel sur une large gamme de températures sans modification significative de ses propriétés (-65°C à 200°C), son taux de dégazage est faible sous vide, il présente une grande transmittivité sur tout le spectre solaire (cf. Figure 8.2), a une relativement bonne résistance aux radiations, et finalement, il est déjà qualifié pour l'espace [77, 93]. Il est de plus étirable, permettant de se maintenir seul entre les montants du concentrateur. Son grand coefficient d'expansion thermique ($3,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm/cm/}^\circ\text{C}$) est néanmoins à prendre en compte lors du dimensionnement du système de déploiement et de maintien de la lentille. Notons toutefois que d'après les fiches techniques, l'épaisseur du film doit être supérieure à $250 \text{ }\mu\text{m}$ pour être viable seul.

8.2 Indice de réfraction

L'indice de réfraction est très important pour le design optique. En effet, les propriétés de dispersion du matériau vont définir en partie le taux de concentration maximal que l'on pourra atteindre. Nous n'avons cependant pas beaucoup de choix quant au matériau à utiliser étant donné les contraintes du spatial. Nous partons donc directement de l'hypothèse d'utilisation du silicone DC93-500.

La partie réelle de l'indice de réfraction a été approximée à partir de mesures réalisées au Centre Spatial de Liège (CSL), à l'aide d'un réfractomètre [94]. Les 6 points de mesures donnent l'allure de l'indice de réfraction, et une interpolation/extrapolation de Sellmeier [95], rappelée en équation (8.1), donne finalement la courbe complète. Nous avons pris l'hypothèse que l'indice de réfraction suit cette loi sur toute la gamme spectrale. La courbe est reprise en Figure 8.1, avec les points de mesures.

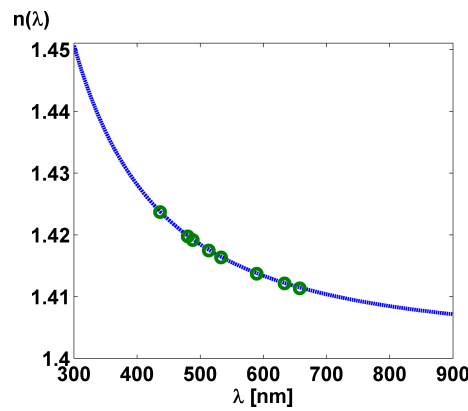


FIGURE 8.1 – Partie réelle de l'indice de réfraction du silicone DC93-500 selon la longueur d'onde. Les points verts correspondent aux mesures réalisées au CSL, tandis que la courbe pointillée bleue décrit l'approximation selon le modèle de Sellmeier.

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2}} \quad (8.1)$$

Les coefficients de l'équation (8.1) obtenus pour le silicone DC93-500 après ajustage sont : $A_1 = 0.9621$, $A_2 = 0.004406$, $B_1 = 0.01129$ et $B_2 = -6.231 \times 10^{-7}$. Les longueurs d'onde sont exprimées en microns.

Le coefficient d'absorption a quant à lui été déduit à partir de mesures de transmittivité d'un film de silicone d'épaisseur connue. Ces mesures ont aussi été réalisées au CSL. De la courbe de transmittivité obtenue, la partie réfléchie a été extraite grâce à la partie réelle de l'indice de l'équation (8.1). Les pertes de transmission restantes proviennent donc de l'absorption du silicone. Grâce aux formules (4.3) et (4.2), nous pouvons finalement déduire le coefficient d'absorption et l'indice de réfraction complexe de notre silicone.

La courbe de transmittivité d'un fin film de silicone calculée à partir de notre indice de réfraction complexe est comparée aux mesures de la littérature [77] en Figure 8.2 : les

deux courbes sont quasiment superposées, validant les hypothèses faites et l'expression de l'indice choisie.

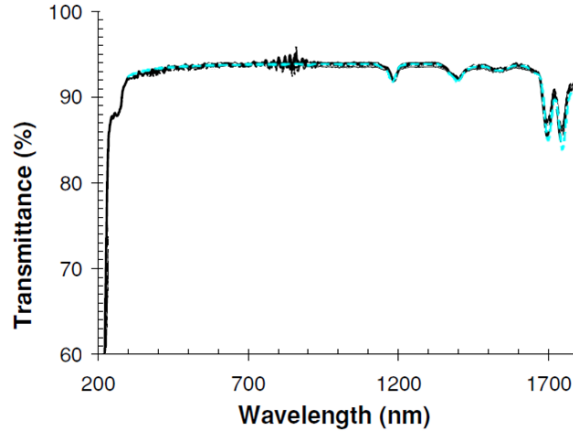


FIGURE 8.2 – Transmittivité d'un film de silicone DC93-500 (152 μm) en fonction de la longueur d'onde. *Courbe noire* : Résultats expérimentaux provenant de la référence [77]. *Courbe bleue en pointillés* : Simulation basée sur l'indice de réfraction complexe calculé à partir des mesures faites au CSL.

8.3 Résistance aux radiations : film anti-UV

Bien que le silicone DC93-500 ait de nombreuses qualités, il possède une faible profondeur de pénétration des longueurs d'onde principalement sous 200 nm [77] : il est donc soumis, à l'instar de tous les silicones, à un jaunissement sous les VUV, comme expliqué au point 6.4.

Cette coloration réduit les performances du concentrateur avec le temps. De plus, les UV rigidifient le silicone, le rendant plus fragile. Une solution a été étudiée et testée dans le cadre du projet SLA (concentrateur décrit en Fig. 2.1 intégrant une lentille de Fresnel en silicone DC93-500), concernant un film anti-UV placé sur la lentille. Ce revêtement anti-UV est adopté ici comme une solution possible pour notre concentrateur, puisqu'il est basé sur les mêmes matériaux que ceux du concentrateur SLA. L'effet de protection de ce revêtement est évoqué en Figure 8.3, pouvant être comparé aux dégradations abordées en Figure 6.3. Ce revêtement est composé d'un multi-couche oxyde, difficile à réaliser, d'autant plus sur un substrat flexible et étiré. Les deux principales influences agissant sur le film anti-UV sont la différence de coefficients d'expansion thermique entre le revêtement et le substrat (silicone : $\sim 3,2 \cdot 10^{-4} \text{cm/cm/}^\circ\text{C}$, revêtement : $\sim 4 \cdot 10^{-7} \text{cm/cm/}^\circ\text{C}$), et les contraintes intrinsèques dépendant du processus de fabrication du matériau du film anti-UV. De très nombreux tests et essais ont été nécessaires pour parvenir à une solution stable, qui ne se fissure pas sous les contraintes des tests simulant l'environnement spatial [96, 78].

Outre les VUV, les radiations sont aussi dommageables pour le silicone. Ainsi, le concentrateur SLA est aussi protégé par un revêtement sous forme de « grille » de 1 à 5 μm d'épaisseur [97]. Cette protection supplémentaire offre une résistance en plus face aux radiations, tout en maintenant la flexibilité de la lentille [96, 78].

Sur base des développements du SLA, nous considérerons donc que protéger le silicone des UV est possible, et qu'au moins une solution valable et testée est à notre disposition. La forme plane de notre concentrateur facilitera d'autant plus le dépôt et la tenue de ce revêtement, principalement dans l'hypothèse d'une superposition des deux structures dentelées sur la face arrière, laissant la face avant plane (voir [Annexe F](#)).

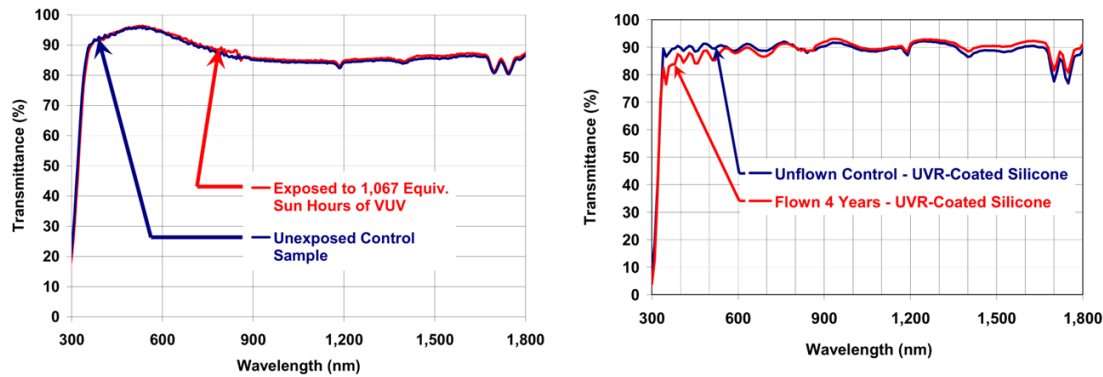


FIGURE 8.3 – Revêtement anti-UV développé pour le SLA : il réfléchit les UV et réduit donc fortement la coloration du silicone [97]. *Gauche* : Récent revêtement testé sur Terre. *Droite* : Précédent revêtement testé sur la station spatiale internationale durant 4 ans.

8.4 Problème de TacSat4 : déchirure de la lentille

Le test en vol du SLA à bord de la mission TacSat4 a mis en évidence un point faible majeur du concept : après 14 mois, la lentille en silicone s'est déchirée [98]. Les hypothèses sur la cause de cette déchirure sont les suivantes :

- Les radiations (plus importantes que prévues dans les simulations d'orbite) ont fragilisé/rigidifié la lentille, qui s'est finalement déchirée sous l'effet des cyclages thermiques, des UVs, etc.
- Le lancement du concentrateur en position déployée l'a soumis à des contraintes supplémentaires et rendu plus sensible.

C'est la tension mise dans la lentille pour maintenir sa forme qui serait à l'origine de la fragilité du concentrateur. Les solutions incluent soit la réduction de la charge mise dans la lentille, soit le changement total du type de matériau et/ou de principe de maintien.

Changement de matériau ou combinaison avec un substrat

Changer de matériau ou de système de fonctionnement remet en question les études initiales sur le choix de ce matériau [99, 100]. D'autres candidats sont difficiles à trouver, il n'existe pas de matériau parfait et le silicone se révèle toujours le plus adéquat.

Une combinaison avec un film substrat plus rigide (pour soutenir la tension à la place du silicone) est une autre option. Cependant, cela risque d'engendrer une augmentation de la masse ou au moins des problèmes supplémentaires de compatibilité de matériaux (coefficients d'expansion thermique différents, etc.) et vis-à-vis de leur résistance mécanique à l'environnement spatial. Néanmoins, il existe maintenant des possibilités de verre

protecteur bien moins épaisses ($50\text{ }\mu\text{m}$) que dans le cas de SCARLET ($> 100\text{ }\mu\text{m}$ [5]), n'alourdissant donc que peu le concentrateur, et permettant l'usage notamment d'un revêtement anti-UV connu et éprouvé [101]. Cette méthode a fait ses preuves pour SCARLET, et elle est d'autant plus facile à appliquer pour un concentrateur plan comme le nôtre. C'est donc aussi une option à éventuellement reconsidérer dans le cas où un matériau seul ne suffirait pas pour répondre aux contraintes de la mission considérée.

En mettant de côté les solutions avec un substrat, et étant donné que dans les matériaux commercialisés, aucun n'a la grande transmittivité dans le visible, relativement bonne résistance aux radiations y compris UVs, ou le faible taux de dégazage du silicone DC93-500, il semble plus simple de tenter de résoudre le problème avec le silicone. D'autant plus que tous les tests de validation effectués pour le concentrateur SLA furent passés avec succès.

Consolidation de la lentille en silicone

Après l'incident de la mission TacSat, le problème majeur identifié était la sollicitation mécanique trop importante du silicone, initialement étiré à environ 102% entre les montants pour maintenir sa forme, et ne faisant qu'augmenter sous l'effet des radiations. La solution préconisée est alors d'insérer dans le silicone, ou simplement coller au silicone, des câbles d'un matériau plus rigide de sorte à soulager la lentille (Kevlar ou aluminium par exemple). Cette méthode est décrite en Figure 8.4 [98, 102, 90]. La solution semble séduisante, mais de plus amples investigations sont nécessaires avant de valider le concept, notamment au niveau de la différence des coefficients thermiques. Notons que dans le cas de notre concentrateur, la configuration plane permet de placer des câbles dans le sens transverse, à l'instar des montants, mais plus régulièrement alors, de sorte à réduire potentiellement la tension nécessaire dans la lentille. La forme plane est aussi de base moins contraignante.

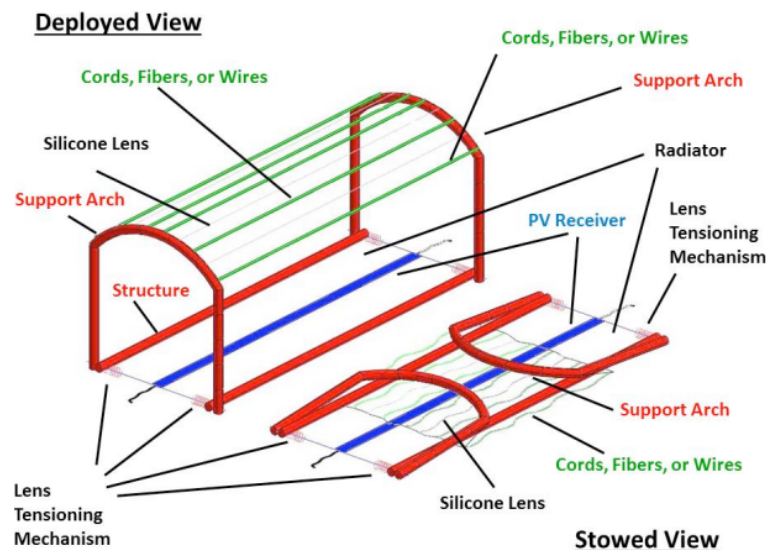


FIGURE 8.4 – Concentrateur SLA incluant des câbles pour consolider la lentille [102].

Accommodation de la rigidification

Une dernière solution est de lier la lentille à un ressort approprié au niveau des montants, un peu comme proposé dans le brevet [16], mais non pas ici pour s'accommoder d'une variation thermique, mais bien d'une rigidification. Cette solution demande aussi plus d'investigation, notamment sur le dimensionnement du ressort.

Conclusions

Le problème rencontré lors du test en vol provient principalement de l'orbite plus contraignante que prévu point de vue radiations. Dans des conditions normales, peut-être n'y aurait-il pas eu de déchirure. De même, le lancement en position déployée n'est pas à l'avantage de la résistance du concentrateur non plus. Une solution a été proposée par les concepteurs du SLA, comprenant la solidification de la lentille via des câbles rigides sous tension. Une autre solution inclut des ressorts au niveau des montants du système. Ces solutions sont intéressantes, mais nécessitent de plus amples investigations. Choisir un autre matériau n'est par contre pas la solution la plus facile car elle remet en question le déploiement, la masse globale, et nécessite d'être testée comme l'a été le silicone pour l'application de concentrateur en question.

Dans notre cas, l'élément optique est plan, réduisant un peu les contraintes sur la lentille. Si les problèmes des radiations se révèlent identiques et mènent à une déchirure même pour une orbite « normale », les solutions des câbles dans l'axe cylindrique et transverse, ou des ressorts seront à envisager, ou éventuellement l'ajout d'un substrat. Quelle que soit la solution choisie, elle ne modifie pas les méthodes d'optimisation et le principe de conception de notre concentrateur. La seule différence résidera dans les faibles pertes optiques dues aux câbles ou aux interfaces avec le matériau substrat.

Indépendamment, des configurations de stockage et de déploiement moins contraignantes mécaniquement (évitant les plis qui pourraient être initiateurs de déchirures) pourraient aussi faire partie de la réflexion.

8.5 Conclusions

Les contraintes de l'environnement spatial limitent le choix du matériau. Dans notre cas, le silicone DC93-500 semble un bon candidat. Cependant, il n'y a pas de matériaux parfait et le silicone ne fait pas exception : il jaunit sous les UVs, nécessitant un revêtement anti-UVs relativement complexe, et la dernière expérience en vol a révélé une déchirure de la lentille en silicone... Malgré tout, nous avons opté pour le silicone DC93-500 pour le développement de notre concentrateur. Nous avons en effet misé sur le fait que des revêtements anti-UVs existent, que la lentille en silicone du projet SLA a soutenu tous les tests de qualifications, et que des solutions pour éviter les déchirures sont envisageables. Si le développement de notre concept de concentrateur solaire est réalisé avec ce matériau, il est aussi adaptable à tout type de matériau : les méthodes d'optimisation demeurent les mêmes, seul l'indice de réfraction change, modifiant légèrement les résultats finaux et les limitations en termes de taux de concentration et de tolérance au dépointage. Il est dès lors possible d'envisager l'utilisation de tout matériau transparent, tel un substrat en verre pour soutenir les structures en silicone, ou du PMMA pour des applications terrestres (voir section 17.1), etc.

Chapitre 9

Motivation, choix des réseaux et des cellules PV

Les deux questions de base posées par cette thèse, sont

1. de déterminer s'il est physiquement/géométriquement possible de séparer spatialement les deux gammes de longueurs d'onde en des spots de dimensions convenables, pouvant correspondre à un concept de concentrateur solaire spatial,
2. de déterminer si le gain de la séparation spectrale au niveau des cellules PV contrebalance les pertes optiques inhérentes à l'utilisation de réseaux de diffraction pour réaliser cette séparation spectrale.

La première question traite des aspects géométriques, qui seront abordés plus tard dans cette thèse (Chapitre 10). La seconde question fait appel à la condition minimale pour que notre concentrateur ait de l'intérêt. Cette condition implique qu'étant donné la complexité supplémentaire de la combinaison avec un réseau de diffraction, les performances doivent être au minimum supérieures à celles d'un concentrateur similaire sans séparation spectrale, focalisant sur une cellule SJ. En effet, comparativement à un concentrateur sans séparation spectrale mais focalisant sur une cellule MJ, notre concept aura toujours l'avantage d'une sensibilité moindre par l'usage de cellules SJ uniquement, ce qui peut, en fin de mission, contrebalancer ses performances inférieures BOL. Mais par rapport à un concentrateur focalisant sur une unique SJ, il n'apporte que de la complexité.

Nous nous attacherons donc à vérifier cette condition minimale dans ce chapitre, notamment par un calcul idéal des performances de sortie, considérant que notre concentrateur est parfait géométriquement. Cette étape sera précédée par la justification du choix de nos réseaux de diffraction et d'une méthode pour choisir les combinaisons de cellules PV les plus adaptées au concentrateur que nous allons développer.

9.1 Choix des réseaux de diffraction

La première étape consiste à choisir les réseaux de diffraction les plus prometteurs, sachant que le but est de travailler d'une part avec la lumière diffractée à l'ordre 1, et d'autre part avec celle à l'ordre 0 (voir Chapitre 3). De nos recherches, trois types de réseaux en relief de surface ont émergé : deux réseaux à relativement grandes périodes, respectivement blazé et lamellaire, et un réseau à faible période. Les raisons de leur choix sont décrites ci-dessous.

(1) Réseau blazé

Les réseaux blazés possèdent la forme optimale pour maximiser l'efficacité de diffraction dans un ordre de diffraction particulier, en l'occurrence l'ordre 1 [42] (voir Annexe G). Les réseaux en relief de surface qui possèdent des périodes respectant les conditions de la théorie scalaire présentent des pics d'efficacité de diffraction assez larges en terme de longueurs d'onde. On parvient donc avec ce type de réseau à avoir une majorité de l'UV-visible diffracté dans l'ordre 1, et le proche IR-IR dans l'ordre 0, comme l'illustre la Figure 9.1(c) (réplique de la Figure 4.4). Cependant, il n'existe pas d'élément optique capable d'une séparation spectrale parfaite, et le réseau blazé ne déroge pas à la règle : une partie de la lumière est diffractée dans les ordres supérieurs (principalement les ordres -1 et 2) et par conséquent perdue pour notre application. La somme de la lumière a priori utilisable pour notre concentrateur est la courbe de « somme » de la Figure 9.1(c). Ceci fait partie des pertes intrinsèques au principe de base de notre concentrateur.

(2) Réseau lamellaire symétrique

Les pertes du réseau blazé dans le spectre UV-visible sont principalement dues à l'ordre 2. Un profil permettant de supprimer ce second ordre de diffraction est le profil lamellaire symétrique [103, 48], déjà abordé en section 4.2.2. Cependant, puisque complètement symétrique, nous devons travailler avec 3 ordres de diffraction : les ordres 0, +1 et -1. Pour en tirer parti, nous considérerons une géométrie aussi symétrique, permettant de superposer les ordres +1 et -1 sur la même cellule (voir développement en section 10.5). Les efficacités de diffraction, dans le cas d'une grande période par rapport à la longueur d'onde, sont reprises en Figure 9.1(d), avec la somme des ordres 0, +1 et -1 : on observe ici l'absence d'ordre 2, et donc potentiellement une limitation des pertes dans les UV-visible. Une autre particularité de ce réseau est la transition spectrale entre les ordres 0 et ± 1 , qui a lieu sur un intervalle spectral beaucoup plus court que pour le réseau blazé. Cette propriété devrait permettre une séparation spectrale plus efficace et un meilleur équilibre entre les puissances de sortie des cellules VIS et IR.

(3) Réseau à petite période

Evidemment, si l'on souhaite collecter toute la lumière incidente dans les ordres 0 et 1 uniquement, la solution triviale est d'utiliser un réseau de diffraction possédant une très petite période (de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière). Ainsi, avec le bon angle d'incidence, on supprime les autres ordres de diffraction en transmission, ne gardant que l'ordre 0 et l'ordre 1 (comme mentionné en section 4.2.1). Cependant,

par définition, les angles de diffraction de l'ordre 0 à l'ordre 1 couvrent alors près de 90° , et une simple lentille accolée ne pourra pas les focaliser comme souhaité. Cette solution implique donc une autre configuration géométrique, avec la lentille et le réseau spatialement séparés, incluant probablement des miroirs secondaires, et donc un système plus complexe. De plus, le réseau ne répondant pas à la théorie scalaire, son efficacité de diffraction est fortement sensible à l'angle d'incidence. Ceci rend le système potentiellement plus sensible au dépointage et aux erreurs de fabrication. Il ne sera abordé qu'en terme de piste de perspectives possible, au point 16.1.

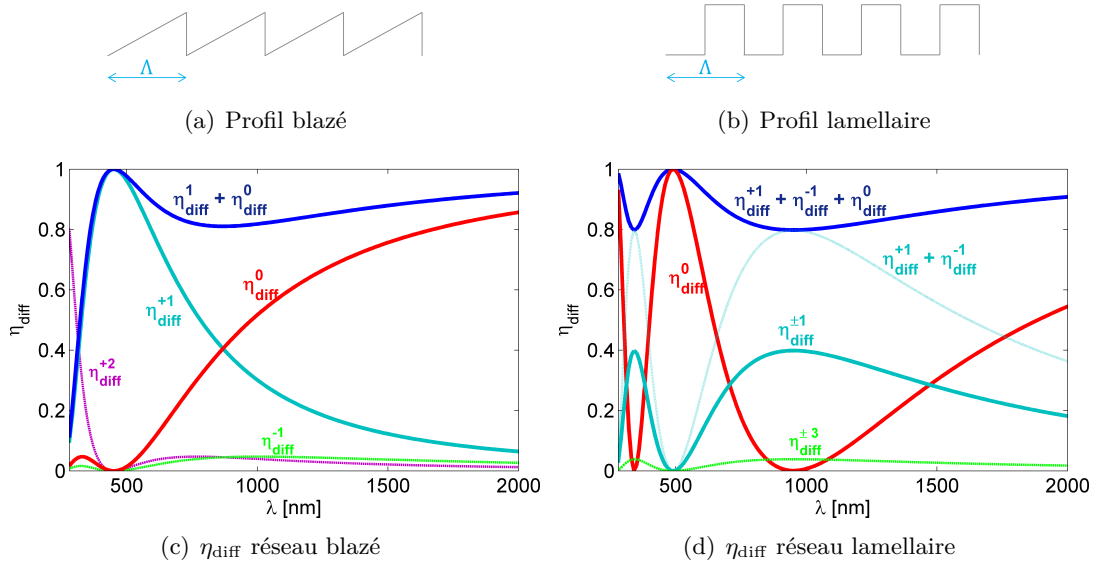


FIGURE 9.1 – Exemple de profil et d'efficacité de diffraction pour un réseau blazé (a-c) et un réseau lamellaire symétrique (b-d), avec une longueur d'onde de blaze de 500 nm. Les deux ordres de diffraction principaux sont l'ordre 0, et l'ordre 1, avec un maximum à λ_{blaze} dans l'ordre 1 pour le réseau blazé, et dans l'ordre 0 pour le réseau lamellaire. Les courbes sommées (ordres ± 1 et 0) présentent la lumière a priori utilisable pour notre concept de concentrateur, et mettent en évidence la partie intrinsèquement perdue dans les ordres supérieurs. Les profils (a-b) ne sont pas à l'échelle.

D'autres formes de réseaux ont également été testées, dans le but de choisir « le » profil le plus adapté à notre concentrateur. Cependant, en partant des profils proposés ci-dessus, toute altération par une modification de pente, insertion de marches, cassures, ou autres, réduit la somme de l'énergie diffractée dans les ordres 0 et 1, en augmentant la partie perdue dans les ordres de diffraction supérieurs. C'est ainsi que nous nous sommes arrêtés sur les trois types de réseaux décrits ci-dessus, maximisant l'énergie diffractée dans les ordres 0 et 1, et donc les plus adaptés à notre application.

9.2 Méthode pour le choix des combinaisons de cellules PV couplées à la longueur d'onde de blaze

Pour les réseaux blazé et lamellaire a priori à grandes périodes, la théorie scalaire est applicable, dissociant les aspects d'efficacité de diffraction et d'angles de diffraction, c.-à-d. rendant indépendants les paramètres λ_{blaze} et la période du réseau Λ (voir section 4.2.2). En ne considérant que les aspects d'efficacité de diffraction, sans prendre en compte la géométrie du concentrateur, nous pouvons donc déjà émettre des hypothèses sur les combinaisons optimales des deux types de cellules PV en accord avec la longueur d'onde de blaze du réseau, le tout étant directement lié.

Méthode

Dans le but d'estimer cette combinaison optimale, les hypothèses suivantes sont formulées :

- Les EQEs des cellules sont idéales, c.-à-d. que tous les photons d'énergie supérieure à celle de la bande interdite (E_g) sont convertis. Le modèle décrivant le comportement des cellules PV est celui du Chapitre 5. Le taux de concentration et la température sont identiques pour toutes les cellules PV, posés à $11\times$ et 70°C (ces valeurs sont arbitraires, mais en lien avec les résultats que nous obtiendrons par la suite dans les Chapitres 11 et 12).
- Toute la lumière diffractée dans les ordres 1/0, dont la longueur d'onde fait partie du spectre convertible par la cellule correspondante, atteint cette cellule (cellules VIS/IR pour la configuration blazée, et inversement pour la configuration lamellaire).
- Pour chaque combinaison de E_g , la longueur d'onde de blaze optimale est calculée pour donner en sortie la meilleure puissance électrique totale.
- Les efficacités de diffraction sont décrites par la théorie scalaire.
- Ne rentrent en compte dans l'efficacité de transmission de l'élément optique, que les deux réflexions de Fresnel (sur les faces avant et arrière) et l'absorption d'un film de silicone de $400\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur.

La puissance de sortie théorique optimale correspond alors à l'équation suivante, en fonction de λ_{blaze} et de la combinaison $(E_{g,1}, E_{g,0})$, respectivement les E_g des cellules destinées à collecter les ordres de diffraction 1 et 0 :

$$\lambda_{\text{max},1/0} = h_{\text{Planck}} \cdot c / E_{g,1/0} \quad (9.1)$$

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\lambda_{\text{max},1}} \text{AM0} \cdot \eta_{\text{diff}}^{+1}(\lambda_{\text{blaze}}) d\lambda + \int_0^{\lambda_{\text{max},0}} \text{AM0} \cdot \eta_{\text{diff}}^0(\lambda_{\text{blaze}}) d\lambda \quad (9.2)$$

Résultats

Un exemple de résultat est repris en Figure 9.2 pour les configurations blazée et lamellaire, décrivant la puissance maximale idéale selon les combinaisons de E_g , avec les longueurs d'onde de blaze optimales correspondantes dans le graphique adjacent. On y observe clairement une zone optimale maximisant les performances, à laquelle les cellules PV devront idéalement correspondre. Remarquons que les combinaisons optimales sont différentes pour les deux configurations, principalement à cause des différences de comportement des efficacités de diffraction (Figure 9.1), et notamment de la transition spectrale

plus courte pour le réseau lamellaire. Pour une mono-jonction, le résultat est repris en Figure 9.3, avec un maximum pour une bande interdite correspondant à celle d'une cellule GaAs (~ 1.42 eV).

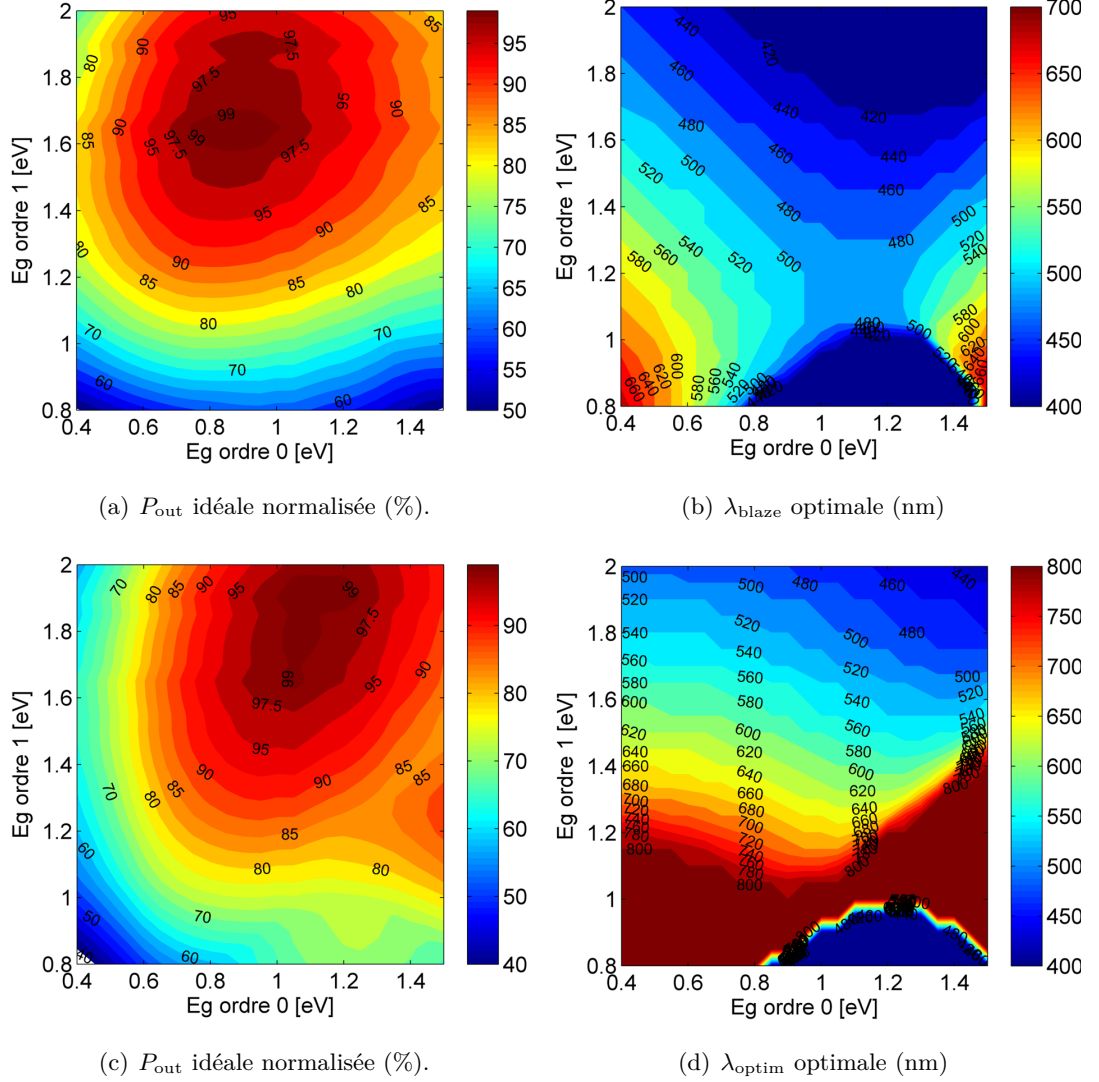


FIGURE 9.2 – Graphiques pour le choix de la combinaison optimale des cellules et λ_{blaze} . Les graphiques du dessus correspondent à la configuration blazée, et ceux du dessous à celle lamellaire. (a/c) Puissance de sortie relative [%] en fonction des combinaisons de E_g . (b/d) Longueurs d'onde de blaze/optim correspondantes. Les combinaisons optimales déduites par cette méthode sont : *Conf. blazée* - (0.95 eV, 1.65 eV) avec $\lambda_{\text{blaze}} = 450$ nm, et *Conf. lamellaire* - (1.15 eV, 1.9 eV) avec $\lambda_{\text{optim}} = 480$ nm.

Ces graphiques permettent donc de déterminer quelles combinaisons de cellules PV et de longueur d'onde de blaze donneront les meilleurs résultats a priori, et de déterminer la valeur théorique idéale de la puissance totale de sortie : ces valeurs sont résumées dans la Table 9.1 dans la section suivante.

A noter qu'ici, on fait l'hypothèse que toute la lumière diffractée aux ordres 0 et 1 atteint

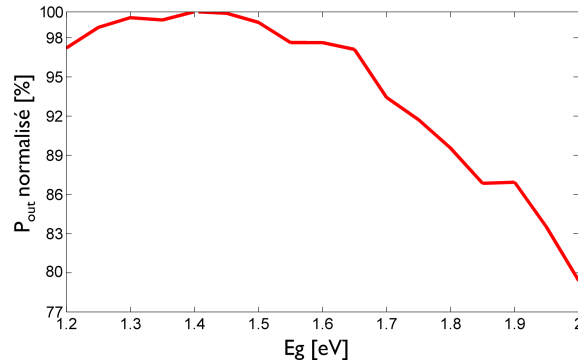


FIGURE 9.3 – Puissance de sortie théorique idéale normalisée pour une mono-jonction en fonction de l'énergie de sa bande interdite. L'optimum se trouve autour de l' E_g du GaAs (1.42 eV).

les cellules correspondantes. En réalité, c'est un peu différent, l'ordre 1 est étalé, les ordres supérieurs interviennent, etc. Ceci fait qu'une fois le système complet optimisé géométriquement, la combinaison optimale des E_g devra être un peu ajustée. Néanmoins, c'est une bonne base pour se diriger vers les meilleures combinaisons.

9.3 Première approximation sur les performances idéales

Les valeurs des puissances maximales idéales correspondant aux graphiques des Figures 9.2 et 9.3 sont reprises dans la Table 9.1, avec les combinaisons des E_g et $\lambda_{blaze/optim}$ optimales.

	Sans séparation spectrale 1 mono-jonction	Réseau blazé 2 mono-jonctions	Réseau lamellaire 2 mono-jonctions
E_g [eV]	1.42	0.95 and 1.65	1.15 and 1.9
$P_{out\ max}$ [W/m ²]	≈ 336	$78 + 257 \approx 335$	$157 + 208 \approx 365$
$\lambda_{blaze/optim}$ [nm]	/	450	480

TABLE 9.1 – Résultats idéaux tirés des Figures 9.2 et 9.3, pour les configurations blazée et lamellaire, ainsi que pour un concentrateur sans séparation spectrale focalisant sur une cellule SJ (GaAs). Ces résultats suivent les hypothèses du point 9.2.

La condition minimale pour notre concentrateur est d'être plus performant qu'un concentrateur identique sans séparation spectrale focalisant toute la lumière sur une mono-jonction [104]. En effet, s'il est moins efficace qu'un concentrateur focalisant sur des MJ, l'avantage du concentrateur pourra toujours être trouvé ailleurs, comme par exemple dans la puissance en fin de vie puisqu'il évite les problèmes de correspondance de courant et de maille de réseau aux interfaces. Mais le minimum est que notre concentrateur utilisant deux mono-jonctions soit meilleur qu'un concentrateur n'en utilisant qu'une, sinon l'idée peut directement être mise de côté. Si l'on regarde la Table 9.1, on observe que la configuration lamellaire mènera théoriquement à de meilleurs résultats, montrant la pertinence du concept. Par contre, la configuration blazée n'est a priori pas plus intéressante que celle sans séparation spectrale. En cause, sa trop lente transition spectrale entre les ordres 0 et 1. Elle nécessitera donc une optimisation géométrique particulière si l'on veut la rendre compétitive. Ces développements seront décrits dans le chapitre suivant.

Bien sûr, ces résultats sont théoriques et basés sur des hypothèses peu réalistes (notamment l'oubli de la configuration géométrique). Ils seront donc modifiés lorsque la configuration géométrique, l'efficacité de transmission exacte, les aspects thermiques et des EQEs plus réalistes de cellules seront inclus (cf. Fig. 10.14 et Chapitre 12). Cependant, ils justifient l'effort mis dans le développement de la configuration lamellaire, et mettent en avant le besoin indispensable d'une optimisation géométrique particulière pour la configuration blazée.

9.4 Liberté du choix des cellules PV vs. DJ monolithiques

Comparer les résultats à une cellule DJ ou une TJ idéale est difficile et imprécis suivant l'hypothèse d'EQEs idéales. Par contre, il est malgré tout possible de mettre en avant la large tolérance de notre concentrateur point de vue combinaisons de cellules PV par rapport aux MJ, sans trop de confiance dans la comparaison des valeurs maximales entre elles. En effet, pour les cellules DJ par exemple, la zone idéale (de 90 à 100% du rendement maximal) de combinaisons de cellules est plus réduite, comme on peut le voir en comparant les Figures 9.4 et 9.2.

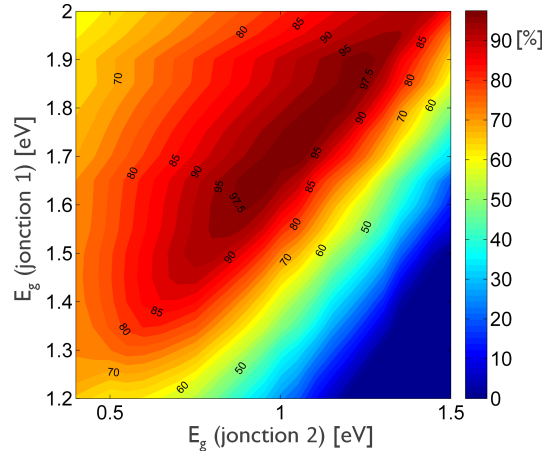


FIGURE 9.4 – Puissance de sortie électrique normalisée calculée avec des EQEs idéales pour une double-jonction sous AM0 et une lentille en silicone. La décroissance autour du point maximum est beaucoup plus rapide que dans le cas de notre concentrateur avec séparation spectrale (voir Figure 9.2). La configuration monolithique limite en plus les combinaisons de E_g accessibles.

Mais en plus, la condition de correspondance de maille de réseau aux interfaces limite le choix des combinaisons à certaines valeurs bien précises. Il est donc difficile de tomber juste sur le maximum avec les combinaisons permises. Si l'on compare les valeurs ainsi obtenues pour les combinaisons accessibles, on obtient au maximum 365 W/m^2 pour une configuration avec séparation spectrale, et seulement 347 W/m^2 pour une DJ 1.4/1.85 eV. Bien sûr, ceci ne tient pas compte des pertes optiques et des EQEs réelles des cellules PV, qui pourront rééquilibrer ces valeurs. Néanmoins, la plus grande flexibilité du concentrateur grâce à la séparation spectrale est évidente.

9.5 Conclusions

Trois informations principales ressortent de ce chapitre :

1. Seuls trois réseaux en relief de surface maximisent l'énergie diffractée dans les ordres 0 et 1 et correspondent donc à nos contraintes : un réseau blazé et un réseau lamellaire symétrique à grandes périodes, ainsi qu'un réseau à faible période. Ce dernier n'est pas en adéquation avec le concept de couplage direct du réseau avec la lentille, ne permettant pas d'espérer des taux de concentration suffisants. Seuls les deux premiers réseaux seront donc utilisés par la suite, répondant par ailleurs a priori aux conditions pour l'utilisation de la théorie scalaire.
2. Une méthode basée purement sur les courbes d'efficacité de diffraction a été mise en place. Elle permet de déterminer les combinaisons optimales des cellules PV et de la longueur d'onde de blaze selon certaines hypothèses. Une fois ces hypothèses levées (notamment l'insertion de la géométrie du concentrateur), les résultats devront être légèrement modifiés, mais ils donnent déjà la direction à prendre. Ce calcul appliqué à une cellule DJ montre la plus grande tolérance de notre concept en terme de combinaison des E_g , ce qui est aussi un avantage.
3. Les résultats de puissances de sortie idéales indiquent un avantage pour le réseau lamellaire comparativement à un concentrateur sans séparation spectrale focalisant sur une SJ, justifiant l'intérêt de notre concept. La configuration avec le réseau blazé n'est par contre pas très performante, et nécessitera par la suite une optimisation géométrique spécifique pour être compétitive.

Chapitre 10

Développement et modélisation du concept optique

Dans le chapitre précédent, le choix des réseaux de diffraction les plus adaptés à notre concept de concentrateur s'est porté sur un réseau blazé et un réseau lamellaire symétrique. Une méthode pour le choix de la combinaison optimale des cellules PV a aussi été mise au point, moyennant l'hypothèse d'un concentrateur parfait. Nous allons maintenant lever cette hypothèse en abordant les aspects géométriques des différentes configurations proposées, le but étant de déterminer s'il est effectivement possible de séparer spectralement la lumière et de la refocaliser en deux points distincts à l'aide d'une lentille et d'un réseau de diffraction, et dans quelles limites.

[9] **Choix des réseaux et des cellules PV**

[10] **Développements et modélisation du concept optique**

Séparation spectrale

↓
+ aspects géométriques

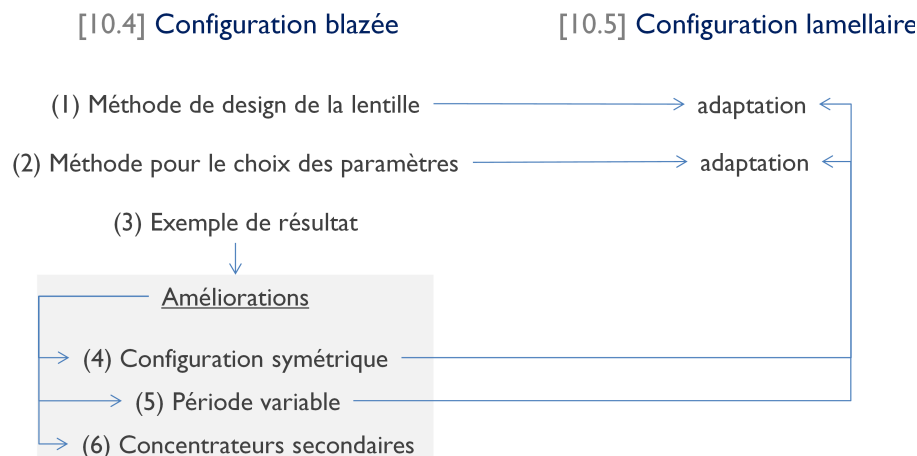
Le chapitre est séparé selon les sections suivantes :

- 1-2. Définitions utiles et principes de base des simulations,
3. Détails des contraintes sur le choix de la période des réseaux,
- 4-5. Développement des méthodes pour l'optimisation des configurations respectivement avec un réseau blazé et un réseau lamellaire symétrique,
6. Conclusions.

Le schéma suivi pour le développement des méthodes d'optimisation (points 4 et 5) est repris dans le diagramme en haut de la page suivante.

La configuration blazée sera présentée en premier lieu, avec les méthodes pour le design de la lentille et le choix des paramètres optimaux, ainsi que les améliorations permettant de rendre le concept intéressant point de vue efficacité optique et taux de concentration. Ces méthodes et améliorations seront ensuite appliquées à la configuration lamellaire, nous donnant les principes pour l'optimisation du concentrateur. L'établissement final des paramètres optimaux ne sera fait qu'en Chapitre 12, selon la configuration et les cellules PV qui seront choisies.

Méthodes d'optimisation



10.1 Définitions

10.1.1 Dimensions des taches focales

La dimension d'une tache focale est définie comme suit :

« Dans un plan focal choisi, pour un ordre de diffraction donné m , c'est la surface contenant tous les rayons diffractés à l'ordre m dont la longueur d'onde correspond à la gamme spectrale convertible par la cellule destinée à collecter l'ordre m . »

Cette tache focale n'est pas la dimension de la cellule PV, simplement la zone d'intérêt pour cette cellule dans le plan focal. La définition est illustrée en Figure 10.1.

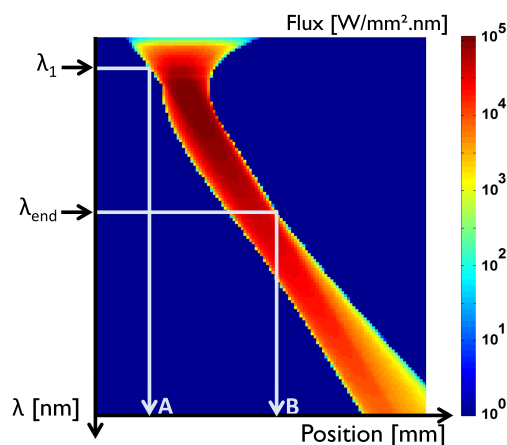


FIGURE 10.1 – Soit l'ordre 1, devant être collecté par une cellule VIS efficace pour des longueurs d'onde comprises entre λ_1 et λ_{end} . La dimension d'une tache focale dans le plan focal choisi est définie par la distance entre les points A et B , correspondant respectivement à l'apparition de la première longueur d'onde d'intérêt λ_1 et à l'extinction de la dernière longueur d'onde d'intérêt λ_{end} .

10.1.2 Taux de concentration géométrique

Le taux de concentration géométrique ($C_{\text{géo}}$) est par définition le rapport entre la surface collectrice (les cellules PV dans notre cas), et la surface de l'élément optique focalisant (la combinaison réseau/lentille pour nous). Puisque le concentrateur est linéaire, le taux de concentration correspond au rapport entre les largeurs respectives de la lentille (L_{lentille}) et des cellules PV ($L_{\text{tot cell(s)}}$). Etant donné que nous avons plusieurs cellules, nous définissons :

$$C_{\text{géo IR}} = L_{\text{lentille}} / L_{\text{tot cell(s) IR}} \quad (10.1)$$

$$C_{\text{géo VIS}} = L_{\text{lentille}} / L_{\text{tot cell(s) VIS}} \quad (10.2)$$

$$C_{\text{géo global}} = \left(\frac{1}{C_{\text{géo IR}}} + \frac{1}{C_{\text{géo VIS}}} \right)^{-1} \quad (10.3)$$

10.2 Méthode de simulation basée sur le raytracing

La forme du concentrateur étant linéaire, l'optimisation et les simulations sont par conséquent réalisées en 2D, selon les axes x et z . Les axes sont définis en Figure 10.2.

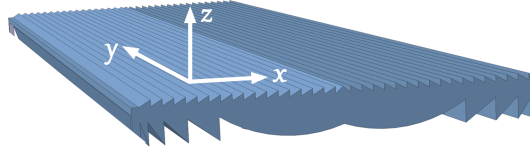


FIGURE 10.2 – Définition des axes : l'axe x se situe le long de la lentille et du réseau, tandis que l'axe y suit la dimension linéaire du concentrateur (aussi appelé « axe cylindrique »). L'axe z est l'axe vertical.

Toutes les simulations et optimisations sont réalisées via des programmes que j'ai développés dans ce but en Matlab[®] [62]. Leur principe repose sur une combinaison de *raytracing* et de théorie de la diffraction. L'approche générale est en partie expliquée ci-dessous. Géométriquement, le trajet des rayons est calculé par la méthode qui suit (la Figure 10.7 peut aider pour visualiser) :

1. Les données initiales sont les vecteurs de profil et de pente locale de la lentille, ainsi que la distribution de la période du réseau le long de la lentille (calculés selon les méthodes présentées dans les sections suivantes).
2. On pose l'hypothèse d'une épaisseur nulle de l'élément optique : chaque point (x, y) de la lentille reçoit les rayons issus du point $(x, f_{\text{eff}} + h_{\text{dent lentille}})$ du réseau.
3. Par la loi de la diffraction, on connaît les angles d'incidence en tout point (x, y) de la lentille, et par la loi de Snell-Descartes, on calcule l'angle de sortie de la lentille θ_{out} .
4. Le point d'impact dans le plan focal est l'intersection de la droite de pente $\tan(\theta_{\text{out}})^{-1}$ passant par le point (x, y) , et de la droite décrivant le plan focal.

Chaque rayon (à chaque longueur d'onde) se voit octroyer un poids, prenant en compte :

1. son incidence - Dans notre système linéaire, la divergence du soleil donne un poids différent aux rayons selon leur angle d'incidence. Une étude pour sa modélisation en 2D a été réalisée et est exposée dans l'Annexe I.1 - ,

2. les réflexions de Fresnel sur chaque surface,
3. l'absorption sélective du silicone,
4. l'efficacité de diffraction selon la théorie scalaire dans un premier temps, puis via PC-Grate[®] dans un second temps.

Le tout est pondéré par le spectre du soleil et par le nombre total de rayons incidents. Etant donné que l'on démarre de la face de sortie de l'élément optique, les rayons considérés ne comprennent que ceux qui l'atteignent, les rayons incidents aux zones mortes (soit les faces verticales dans le cas idéal, Fig. 4.2) ne sont pas pris en compte. Pour remédier à ce problème et éviter d'implémenter un calcul trop complexe et long depuis la face avant, le nombre total de rayon est simplement réévalué à la hausse : on y ajoute la zone d'ombrage, soit la projection de la zone morte sur l'interface supérieure (réseau) selon l'angle de diffraction interne, cf. Annexe I.2. Cette méthode est aussi applicable au cas d'un angle de dépouille pour lequel la zone morte est simplement plus grande.

Les résultats dans le plan focal ont été vérifiés grâce à un logiciel de *raytracing* professionnel non-séquentiel, nommé ASAP[®] [105]. Les simulations de vérification ASAP[®] sont résumées en Annexe I.3, y compris l'hypothèse d'épaisseur nulle. Celle-ci sera testée à nouveau dans le cadre d'une variation du vecteur période le long de la lentille, détails en Annexe J.2.

10.3 Contraintes sur la période du réseau de diffraction

Les réseaux de diffraction ont la particularité de diffracter la lumière. Comme expliqué en section 4.2, les angles de diffraction suivent la loi de la diffraction (éq. 4.4), donnant les angles de diffraction selon l'incidence, l'ordre de diffraction et la longueur d'onde. Ainsi, à l'ordre 1, la lumière se retrouve « étalée » avec de plus petits angles pour les courtes longueurs d'onde, et inversement pour les grandes longueurs d'onde. Le défi est alors de réussir à focaliser correctement la lumière à la fois dans l'ordre 0 et l'ordre 1, malgré leurs différences de longueurs d'onde d'intérêt et d'étalement. Ainsi, sur base d'hypothèses simples, il est déjà possible de déterminer quelles seront les périodes minimales et maximales acceptables pour à la fois garder toutes les longueurs d'onde d'intérêt dans les ordres correspondants, mais aussi respecter un taux de concentration et une tolérance au dépointage acceptables. C'est ce qui a été entrepris dans cette section.

10.3.1 Période minimale

Point de vue efficacité de diffraction

Deux limites sont à prendre en compte au niveau de l'efficacité de diffraction. Premièrement, il faut que toutes les longueurs d'onde convertibles par les cellules PV soient transmises au travers de l'élément optique. Deuxièmement, il est nécessaire de contrôler les pertes d'efficacité de diffraction dans les ordres 0 et 1. Ces deux points imposent certaines contraintes sur le choix de la période minimale :

1. *Limite pour la transmission des longueurs d'onde d'intérêt*

Comme évoqué au point 4.2.1, plus la période est petite, plus les angles de diffraction sont grands, d'autant plus pour les ordres de diffraction supérieurs et les grandes longueurs d'onde. Une fois que cet angle de diffraction atteint 90° , la lumière diffractée

devient évanescence et n'est plus transmise. Même à l'ordre 1, la situation peut apparaître pour les plus grandes longueurs d'onde. Pour garder toute la lumière visible souhaitée dans l'ordre 1, il existe donc une période minimale.

Cette limite peut être simplement calculée. Soit la longueur d'onde maximale à collecter λ_{\max} , la période minimale pour que cette longueur d'onde soit transmise à l'ordre 1 suit l'expression suivante, dérivée de l'équation (4.4) :

$$\sin(90^\circ) = \sin(\theta_{\text{inc}}) + \lambda_{\max}/\Lambda$$

Ceci donne une période de minimum 920 nm pour avoir toutes les longueurs d'onde sous 900 nm, avec 1.26° d'incidence (soit la divergence du soleil + tolérance souhaitée).

2. Eviter les pertes d'efficacité de diffraction

Un autre aspect doit être pris en compte si l'on décide de travailler avec de grandes périodes, dans le domaine scalaire : les réseaux à grandes périodes maximisent le pic à l'ordre 1 plus la période est grande, comme dit en section 4.2.2. Dans ce domaine scalaire, il est donc plus favorable de travailler avec de grandes périodes. Suite au graphique 10.3, on détermine une période minimale autour de 20 μm pour éviter des pertes supérieures à 1% par rapport à la convergence (valeur de la théorie scalaire).

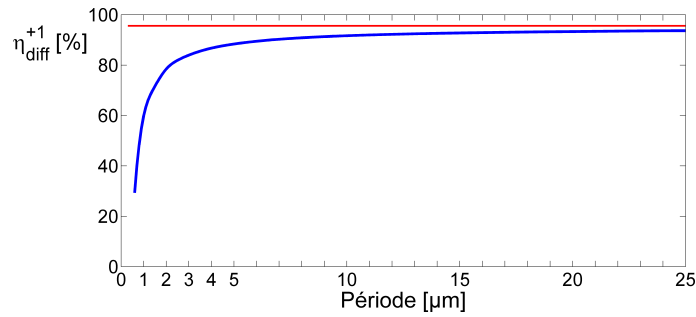


FIGURE 10.3 – Exemple d'efficacité de diffraction au premier ordre d'un réseau de diffraction blazé en verre BK7, à sa longueur d'onde de blaze, en fonction de sa période. Les lignes rouge et bleue correspondent respectivement aux simulations via la théorie scalaire, et via PC-Grate® (théorie rigoureuse). On voit que plus la période du réseau est grande, plus l'approximation de la théorie scalaire devient précise.

Point de vue taux de concentration

Par ailleurs, si l'on veut limiter les angles de diffraction à des valeurs acceptables pour être focalisables par la lentille, il faut aussi se diriger vers des réseaux à plus grandes périodes. Le taux de concentration de l'ordre 0 ne dépend pas directement de la période du réseau de diffraction. Par contre, on peut s'intéresser à l'ordre 1. Si l'on considère la concentration globale maximale à l'ordre 1 à partir du rayon principal aux deux longueurs d'onde extrêmes, on écrit l'approximation suivante :

$$\sin(\theta_{\text{diff min}}) = \sin(-\theta_{\text{sun}}) + \lambda_{\min}/\Lambda \quad (10.4)$$

$$\sin(\theta_{\text{diff max}}) = \sin(\theta_{\text{sun}}) + \lambda_{\max}/\Lambda \quad (10.5)$$

$$d = \tan(\theta_{\text{diff max}}) \cdot f_{\text{eff}} - \tan(\theta_{\text{diff min}}) \cdot f_{\text{eff}} \quad (10.6)$$

$$C_{\text{géo}}^1 = d \cdot F \# / f_{\text{eff}} \quad (10.7)$$

Les équations (10.4) et (10.5) sont issues de l'équation de la diffraction (4.4). Un exemple de résultat est repris en Figure 10.4, pour des longueurs d'onde extrêmes à collecter à l'ordre 1 entre 400 et 900 nm. On observe que si l'on veut atteindre un taux de concentration aux environs de $10\times$ pour la cellule PV collectant la lumière diffractée à l'ordre 1, il faut viser des périodes supérieures à $20\text{ }\mu\text{m}$, sans tolérance à l'angle d'incidence. Ceci en fonction évidemment du $F\#$ choisi (ici, $F\# = 3$). L'ajout d'une contrainte sur la tolérance à l'angle d'incidence diminue encore le taux de concentration maximum atteignable.

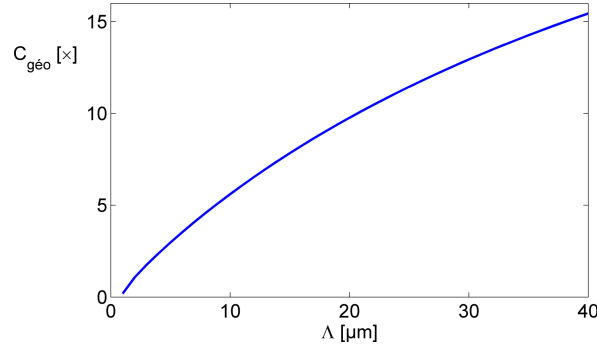


FIGURE 10.4 – Approximation du taux de concentration maximum atteignable si l'on collecte toute la lumière (entre 400 et 900 nm) diffractée à l'ordre 1, dans le plan focal d'une lentille de $F\#$ 3, en fonction de la période du réseau de diffraction.

10.3.2 Période maximale

Bien évidemment, il y a aussi une période maximale à ne pas dépasser. Celle-ci est liée à la distance minimale à avoir entre les ordres de diffraction pour pouvoir absorber une erreur de pointage. Le graphique 10.5 donne l'évolution de la période maximale en fonction de l'angle de dépointage à absorber. Ainsi, on observe qu' 1° d'erreur de pointage ne permet pas des périodes supérieures à $23\text{ }\mu\text{m}$. Ceci limite déjà largement la tolérance maximale que l'on pourra atteindre. Ce calcul n'est cependant qu'une indication basée sur les rayons passant par l'apex de la lentille : l'équation impose que l'angle de diffraction minimum à l'ordre 1 soit égal ou supérieur à la tolérance angulaire souhaitée. En prenant en compte tous les effets (non-idéalité de la lentille, dispersion du matériau, divergence du soleil, etc.), la période acceptable sera légèrement inférieure à cette limite.

10.3.3 Conclusions

Si l'on se base sur la configuration lentille/réseau proposée, la période minimale pour atteindre un taux de concentration acceptable se situe autour de $20\text{ }\mu\text{m}$. On se situe alors dans le domaine scalaire, et une période minimale de $20\text{ }\mu\text{m}$ est aussi fixée pour éviter les pertes dans l'efficacité de diffraction. De même, la contrainte sur la tolérance à l'angle d'incidence définit la limite sur la période maximale que l'on peut utiliser, soit un peu supérieure à $20\text{ }\mu\text{m}$ pour notre exemple.

Ces simulations ne sont que des approximations (ne prenant pas en compte les aberrations de la lentille, l'entière du spectre, la dispersion du silicone, etc.), mais elles donnent une indication sur l'ordre de grandeur des périodes possibles, et nous confortent dans le choix de l'optimisation basée sur la théorie scalaire. La valeur de période minimale demeurera

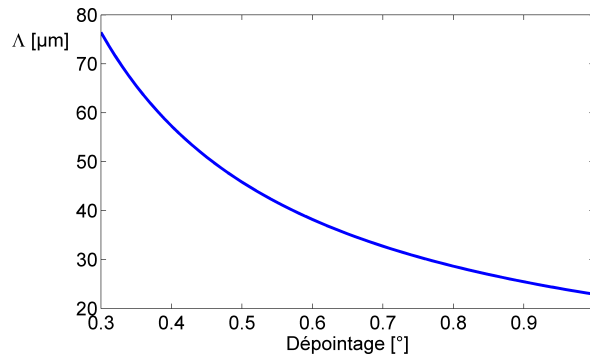


FIGURE 10.5 – Approximation de la période maximale acceptable en fonction de l’erreur de pointage à absorber. Longueur d’onde minimale à collecter à l’ordre 1 = 400 nm.

de 20 μm pour le reste du travail. La période maximale sera par contre optimisée au cas par cas, impliquant à la fois les problèmes de géométrie et de tolérance au dépointage. Des valeurs légèrement supérieures ou inférieures pourront donc être rencontrées selon les choix d’optimisation.

Si l’on se dirige vers une solution où la lentille et le réseau sont séparés (voir point 16.1), alors la période peut être beaucoup plus petite, et la période minimale est définie par les longueurs d’onde à collecter sur la cellule. Les relations géométriques sur le taux de concentration sont alors à refaire pour cette autre configuration.

10.4 Développement de la configuration blazée

La première configuration à avoir été étudiée complètement fut la configuration blazée, étant donné qu’elle correspond à la première idée que nous avons conçue de notre concentrateur. C’est donc avec cette configuration que nous débuterons l’optimisation géométrique du concentrateur ^{1 2 3}.

L’optimisation comprend plusieurs étapes. La première étape consiste à travailler avec une période de réseau fixe, et donc une lentille dont la forme doit être optimisée en conséquence. La seconde étape revient alors à déterminer l’influence des paramètres de design sur le concentrateur, pour parvenir finalement à un compromis entre le taux de concentration, l’efficacité optique et la tolérance au dépointage. Les premiers résultats seront présentés, ainsi que différentes améliorations significatives du design.

10.4.1 Méthode pour l’optimisation du profil de la lentille de Fresnel

La configuration blazée se base sur le concept initialement proposé dans la section 3. La période du réseau est choisie supérieure à 20 μm conformément aux conclusions

1. La présentation et l’optimisation du concept original de notre concentrateur ont fait l’objet d’un poster : C. Michel & S. Habraken, *Study of a space solar concentrator based on a diffractive/refractive optical combination*, poster présenté lors du *Comice Energie Solaire*, Jambes, Belgique, 23 avril 2012.

2. Ceci a aussi fait l’objet d’une présentation orale lors d’une conférence internationale : C. Michel, J. Loicq, F. Languy, A. Mazzoli & S. Habraken, *Study of a solar concentrator for space based on a diffractive/refractive optical combination*, communication orale lors du Congrès *OSA Renewable Energy and the Environment Meeting - Optics for Solar Energy*, Eindhoven, Pays-Bas, 11-14 novembre 2012.

3. Toutes les publications réalisées durant cette thèse sont listées à la fin du document.

du point 10.3. Quant à la forme de la lentille, elle est optimisée pour maximiser le taux de concentration global, c.-à-d. pour minimiser les dimensions des deux taches focales correspondant respectivement à la lumière non-diffractée, et à celle diffractée à l'ordre 1. Etant donné que l'ordre 1 est beaucoup plus dispersé angulairement que l'ordre 0, l'optimisation de la lentille s'attache particulièrement à la focalisation de ce premier ordre de diffraction.

Paramètres

La lentille possède une hauteur de dents constante, arbitrairement choisie à 150 μm . Elle pourrait être modifiée à toute valeur souhaitée, selon la qualité attendue du processus de fabrication notamment. La forme idéale de la lentille passe par l'optimisation de la combinaison des 4 paramètres définissant notre lentille dans le contexte du concentrateur, dont une partie a déjà été évoquée au point 4.1.1 :

1. La période (Λ) du réseau de diffraction.
2. Le décentrage de la lentille (*off-axis*).
3. Le $F\#$ de la lentille ($= f_{\text{eff}}/2R$).
4. Les deux longueurs d'onde extrêmes du spectre convertible par la cellule collectrice du premier ordre de diffraction (λ_1^1 et λ_{end}^1).

Méthode

Plusieurs méthodes de design ont été étudiées, notamment des approches non-imageantes classiques [106, 107], ou encore en cherchant la meilleure longueur d'onde à focaliser, ce qui déterminait la forme de la lentille. Cependant, l'approche la plus prometteuse se base sur une moyenne des designs de la lentille pour les deux longueurs d'onde extrêmes à collecter dans l'ordre 1, présentée en Figure 10.6. Le principe est donc de calculer pour chaque longueur d'onde extrême la pente locale idéale pour que le rayon atteigne respectivement le côté droit/gauche de la cellule PV dans le plan focal. Comme il n'est pas possible d'avoir les deux conditions respectées ensemble, c'est la moyenne des deux pentes optimales qui donne la forme finale de notre lentille, correspondant au meilleur compromis.

Une méthode basée sur la combinaison du réseau de diffraction directement avec une lentille classique optimisée sans diffraction (donc optimisée pour l'ordre 0) ne permettrait pas d'obtenir une séparation spatiale suffisante entre les spots correspondants aux ordres 0 et 1, ni une dimension raisonnable de la tache focale à l'ordre 1. Un exemple sera donné dans la section suivante (Figure 10.9), justifiant l'effort d'optimisation de la forme de la lentille.

Le détail de la méthode finalement choisie est repris en Figure 10.7, pour une incidence normale des rayons. Les différentes étapes sont les suivantes :

1. Détermination de l'angle de diffraction β à l'ordre 1 dans la lentille, en fonction de Λ et l'indice de réfraction du matériau composant la lentille ($n_2(\lambda)$).
2. Détermination de l'angle d'incidence α dans le plan focal pour chaque point (x, y) de la lentille, selon le $F\#$ et l'*off-axis*.
3. Calcul de l'angle de la pente locale Θ grâce à la loi de Snell, de sorte que l'angle d'entrée β corresponde à celui de sortie α au travers de l'interface lentille/vide.

Cette opération est répétée deux fois, respectivement avec $\lambda_{\text{foc}} = \lambda_1^1$ et $\lambda_{\text{foc}} = \lambda_{\text{end}}^1$, intégrant éventuellement le cône d'acceptance souhaité ($\pm\theta_{\text{sun}}$ ou $\pm\theta_{\text{sun}} + \text{tolérance}$ au

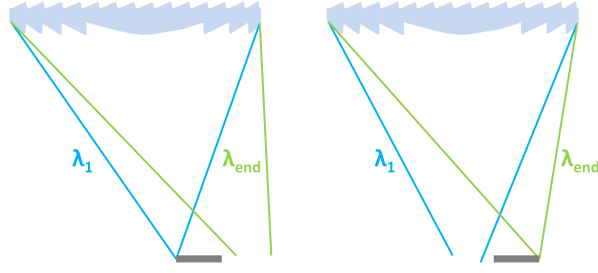


FIGURE 10.6 – Principe de l'optimisation : calcul de la pente 1 pour que la plus petite longueur d'onde λ_1 atteigne la gauche de l'absorbeur, puis calcul de la pente 2 pour que la plus grande longueur d'onde λ_{end} atteigne la droite de l'absorbeur. On voit qu'il n'est pas possible d'avoir les deux conditions respectées ensemble, le compromis choisi est donc la moyenne des pentes 1 et 2.

dépointage). La valeur finale de Θ (Θ_{final}) est la moyenne des deux Θ calculés aux deux longueurs d'onde extrêmes. On obtient finalement le profil idéal de la lentille en fonction de l'EQE de la cellule collectrice, la période du réseau de diffraction, le décentrage et le $F\#$ de la lentille. Le détail des équations est repris en Annexe I.4.

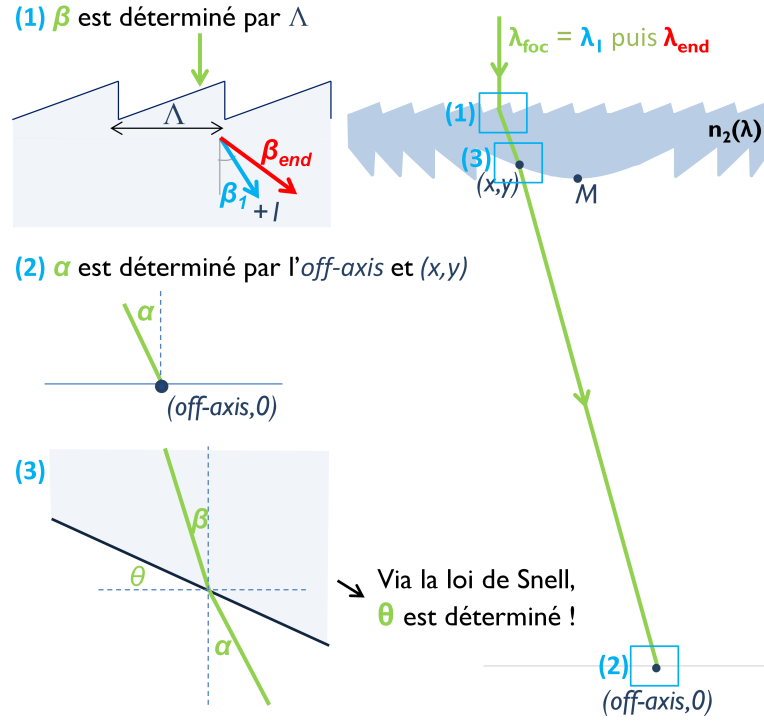


FIGURE 10.7 – Méthode de calcul de la pente locale optimale de la lentille de sorte à parfaitement focaliser un rayon de longueur d'onde λ_{foc} diffracté à l'ordre 1, vers un point de coordonnées $(\text{off-axis}, 0)$, en fonction de la période du réseau de diffraction Λ et du $F\#$ de la lentille. $n_2(\lambda)$ est l'indice de réfraction du matériau dans lequel est réalisé l'élément optique.

Après cette optimisation, le plan focal optimal (maximisant le taux de concentration et la distance entre les taches focales) ne se situe pas exactement à la distance souhaitée de la lentille (correspondant au $F\#$ demandé). Ainsi, une étape supplémentaire est nécessaire, présentée en Figure 10.8 : par itération, le $F\#$ de design nécessaire est déterminé de sorte qu'au final, le plan focal idéal corresponde au $F\#$ initialement souhaité.

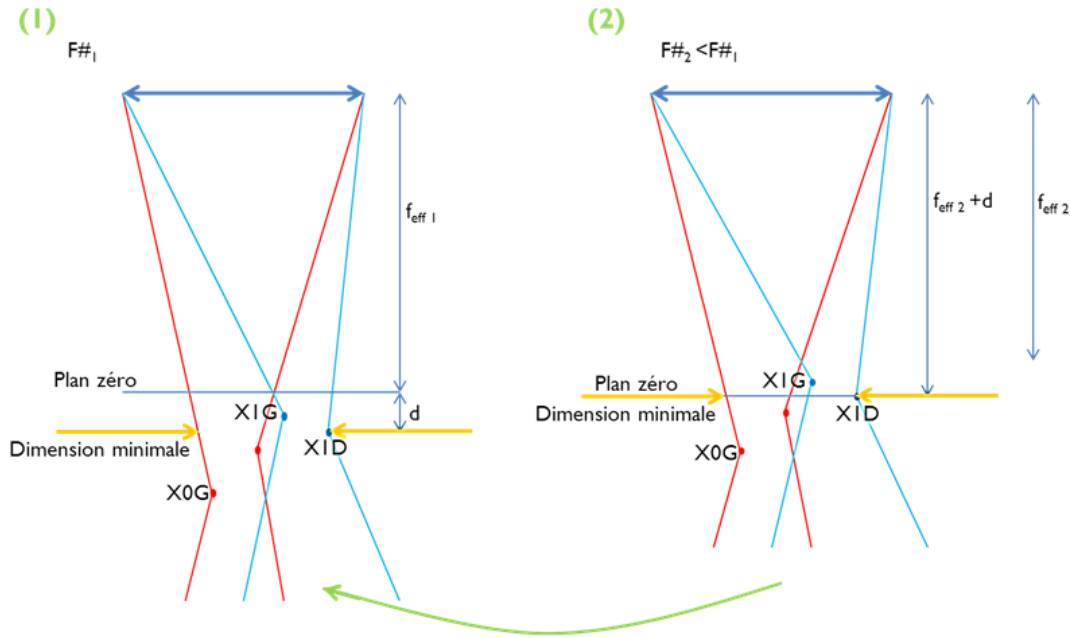


FIGURE 10.8 – Méthode pour obtenir à terme le $F\#$ souhaité. Soit $F\#_1$ le $F\#$ souhaité. On calcule par itération la valeur du $F\#_2 (< F\#_1)$ dont la forme de lentille placée à distance f_{eff1} du plan zéro permet de faire coïncider le plan zéro et les dimensions minimales.

10.4.2 Méthode pour l'optimisation de la combinaison réseau/lentille

Maintenant que la méthode pour obtenir la forme optimale de la lentille en fonction des paramètres période, décentrage, cellules, et $F\#$ est établie, on peut se concentrer sur les effets de ces paramètres et l'optimisation de leur combinaison. Le but au niveau de notre concentrateur solaire est ici de maximiser :

1. le taux de concentration $C_{géo}$ global,
2. la puissance électrique de sortie P_{out} ,
3. la tolérance aux erreurs de pointage définie par l'angle maximal pour conserver 90% de la puissance à incidence nulle ($\theta_{90\%}$).

Le $C_{géo}$ et la tolérance au dépointage dépendent principalement des aspects géométriques, et donc de l'optimisation de la combinaison des paramètres (Λ , $off-axis$, $F\#$). P_{out} a quant à lui deux contributeurs principaux : la concordance entre l'efficacité de diffraction et l'EQE des cellules, ainsi que l'efficacité de transmission de la lentille η_{lens}^{opt} . Le premier point a été discuté en section 9.2, et fixe la longueur d'onde optimale selon la combinaisons des cellules PV. L'efficacité de transmission de la lentille est abordée dans cette section.

Les contraintes sur les 3 paramètres (Λ , *off-axis*, $F\#$) en relation avec $C_{\text{géo}}$, P_{out} (du point de vue de l'efficacité de transmission de la lentille) et $\theta_{90\%}$, sont détaillées dans les points (a) à (c) ci-dessous. Des conclusions de cette étude, un compromis doit être trouvé pour extraire la meilleure combinaison pour notre design : la méthode est présentée au point (d).

(a) Maximisation du taux de concentration $C_{\text{géo}}$

Décentrage et période

Les dimensions des taches focales, leur somme et la distance entre elles, pour un $F\#$ fixé, sont représentées dans la Figure 10.9(b), en fonction du décentrage et de la période du réseau.

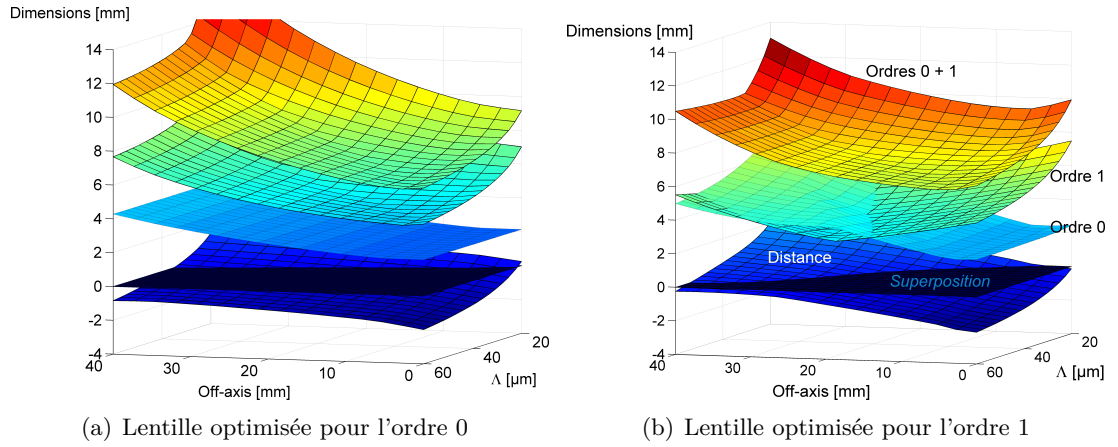


FIGURE 10.9 – Dimensions des taches focales (ordres 0 et 1), leur somme et distance les séparant, en fonction du décentrage (*off-axis*) et de la période du réseau (Λ). Le $F\#$ est fixé à 3, et $R = 25$ mm. La figure (a) donne les résultats pour une lentille optimisée pour l'ordre 0, tandis que la figure (b) donne les résultats pour une lentille optimisée pour l'ordre 1. Nous pouvons observer la réduction des dimensions globales, ainsi que l'accroissement de la distance entre ordres, lorsque la lentille est optimisée pour l'ordre 1.

Les trois observations principales sont les suivantes :

1. Les paramètres *off-axis* et Λ sont fortement couplés.
2. Certaines combinaisons de paramètres mènent à une superposition des taches focales (distance < 0). Cette zone est alors directement exclue de l'optimisation à cause des pertes que cela occasionnerait (longueurs d'onde n'atteignant pas la cellule adaptée et tolérance au dépointage très faible). Les combinaisons impliquant de faibles décentrages et de grandes périodes ne sont donc pas préconisées.
3. Il existe une combinaison particulière (Λ , *off-axis*) qui minimise la taille des taches focales.

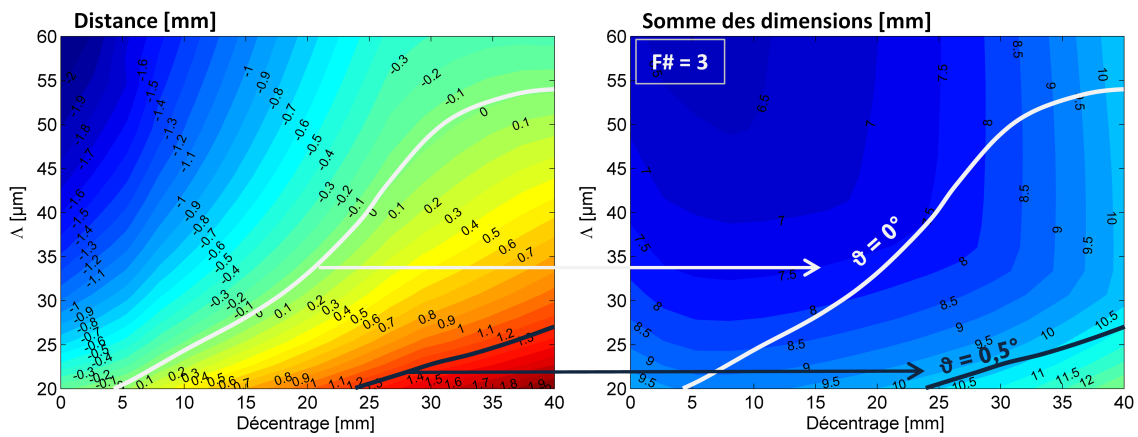
Comparativement à une lentille optimisée pour l'ordre 0, la lentille optimisée pour l'ordre 1 permet d'atteindre des dimensions plus petites avec une distance entre ordres plus grande. Cet avantage est observable en comparaison avec la Figure 10.9(a) : non seulement la distance entre taches focales est plus élevée, mais en plus la dimension globale des taches focales dans la zone de non-recouvrement est de

plus de 2 mm plus petite avec une optimisation à l'ordre 1, qu'avec une optimisation à l'ordre 0, ce qui est déjà conséquent.

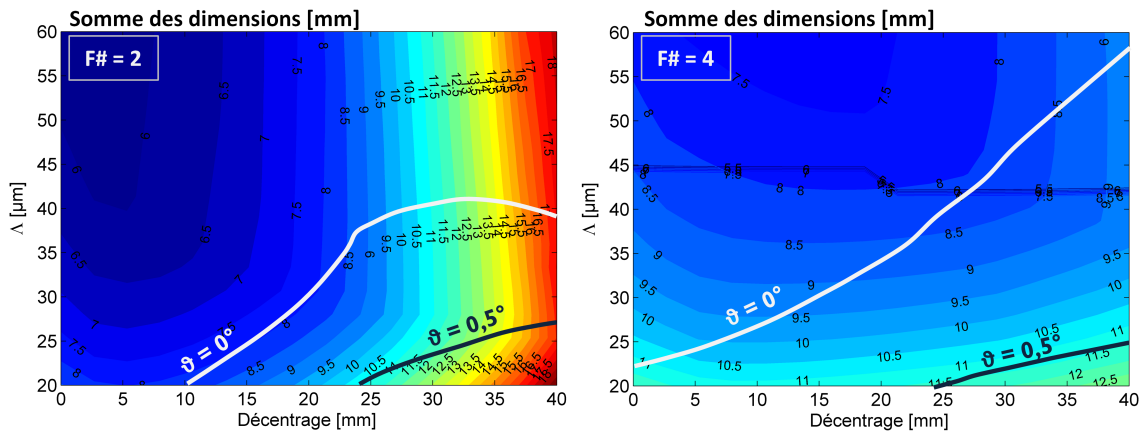
Hors de la zone de superposition, les dimensions minimales ($C_{\text{géo}}$ maximum) sont obtenues lorsque la distance entre les taches est nulle. Cependant, si l'on intègre la contrainte d'une tolérance à l'angle d'incidence, cette distance devra être positive sous peine d'avoir des tolérances extrêmement réduites.

$F\#$

L'analyse de la Figure 10.9 a été effectuée pour différents $F\#$. Les résultats et la méthode d'analyse pour le choix du $F\#$ optimal sont décrits dans la Figure 10.10.



(a) Méthode et résultat pour $F\# = 3$



(b) Résultats pour $F\# = 2$ et 4

FIGURE 10.10 – Méthode de détermination du $F\#$ optimal. (a) La méthode utilisée est la suivante : pour $\theta = 0^\circ$ (pas de tolérance au dépointage), la distance entre ordres doit être égale à 0 puisqu'une superposition réduirait l'efficacité de séparation spectrale. Pour avoir $\theta = 0.5^\circ$, il faut avoir $d = \tan(0.5) \cdot f_{\text{eff}}$, soit une distance d'environ 1.3 mm. Ce sont les deux courbes blanche et en bleu foncé dans le graphique des distances (en haut à gauche). On détermine alors les dimensions minimales des taches focales pour respecter ces conditions en reportant ces distances minimales sur le graphique de droite. (b) Cette même approche a été appliquée pour des $F\#$ de 2 et de 4. Les résultats montrent que quelle que soit la condition sur la tolérance au dépointage (traduite par θ ici), c'est le $F\#$ de 3 qui permet d'atteindre le taux de concentration le plus élevé.

Une contrainte de tolérance au dépointage impose une distance minimale entre ordres, dépendant principalement du $F\#$ choisi. En première approximation, pour une tolérance angulaire souhaitée de θ° , cette distance minimale peut s'exprimer comme suit :

$$d = \tan(\theta) \cdot f_{\text{eff}} \quad (10.8)$$

En reportant les combinaisons de paramètres donnant cette distance minimale, dans le graphique des dimensions des taches focales, nous obtenons une approximation des taux de concentration atteignables pour chaque $F\#$. Sur base de la Figure 10.10, l'optimum se révèle être un $F\#$ de 3, minimisant les dimensions des taches focales quelle que soit la tolérance au dépointage souhaitée.

(b) Maximisation de l'efficacité de transmission

L'efficacité de transmission de la lentille $\eta_{\text{lens}}^{\text{opt}}$ se définit comme la fraction de la lumière incidente réfractée par la lentille et collectée dans le plan focal. Elle est donc impactée par les réflexions de Fresnel aux interfaces, l'absorption, les effets d'ombrage des dents, et d'autres imperfections comme les angles de dépouille, arrondissement des dents et la diffusion. Habituellement, l'efficacité de la lentille est représentée selon le $F\#$, mais ici le décentrage et la période du réseau (définissant l'angle d'incidence sur la face inférieure de la lentille) interviennent aussi.

Pour une lentille classique, $\eta_{\text{lens}}^{\text{opt}}$ augmente avec le $F\#$, et se stabilise pour des valeurs au-dessus de 2 [108]. Dans notre cas, le principe est le même : plus le $F\#$ est grand, plus l'efficacité de transmission augmente, mais différemment selon l'ordre de diffraction, le décentrage et la période du réseau. Quelques exemples sont repris en Figures 10.11(a) et 10.11(b), où l'on peut voir respectivement l'accroissement de $\eta_{\text{lens}}^{\text{opt}}$ avec le $F\#$ pour deux décentrages différents, et la dépendance de $\eta_{\text{lens}}^{\text{opt}}$ avec la période et le décentrage à un $F\#$ fixé.

De façon générale, plus l'angle de diffraction est grand, plus la perte est importante. Les pertes sont donc plus grandes pour les ordres supérieurs et les petites périodes. De même, un grand décentrage augmente la courbure de la lentille et donc le nombre de dents, ce qui accroît l'ombrage et réduit $\eta_{\text{lens}}^{\text{opt}}$. Cet effet domine largement les pertes.

(c) Tolérance aux erreurs de pointage

Plus la distance focale et donc le $F\#$ sont grands, plus le décalage dans le plan focal dû à une erreur de pointage est important. Pour accroître la tolérance au dépointage, il faut donc privilégier les petits $F\#$.

Cependant, comme déjà évoqué précédemment, la distance entre les deux ordres de diffraction dans le plan focal détermine une zone « tampon » très importante pour l'absorption des erreurs de pointage. Plutôt que le plus petit $F\#$ uniquement, l'optimum correspond au $F\#$ permettant la plus grande distance entre les taches focales relativement à la distance nécessaire pour absorber un même angle d'incidence. C'est ce qui a été entrepris dans la Figure 10.10.

Cette distance imposée par la tolérance angulaire souhaitée est donc un critère essentiel pour la détermination des paramètres Λ et *off-axis* optimaux.

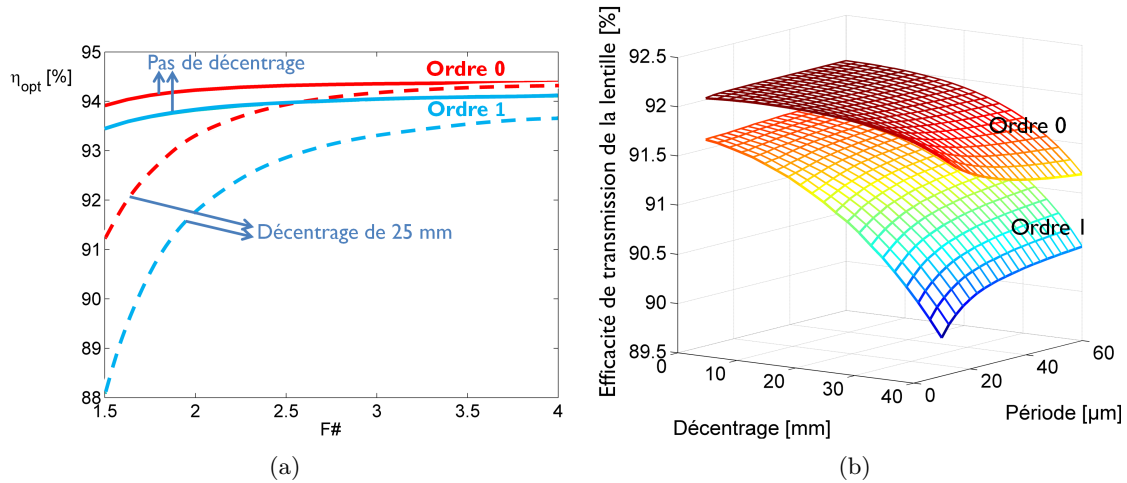


FIGURE 10.11 – (a) Efficacité de transmission (moyenne sur le spectre) d'une lentille de Fresnel en silicone tenant compte des réflexions aux surfaces, en fonction du $F\#$ de la lentille pour les deux ordres de diffraction et deux décentrages. Les courbes sont moyennées pour plusieurs longueurs d'onde : de 600 à 1600 nm pour l'ordre 0 (courbes rouges) et de 400 à 900 nm pour l'ordre 1 (courbes bleues). La forme de la lentille a été optimisée selon la méthode présentée auparavant, avec une période de 20 μm . La hauteur des dents est de 150 μm . On observe l'accroissement des pertes optiques pour des $F\#$ plus faibles, accentué par le décentrage et le degré de l'ordre de diffraction. (b) η_{lens}^{opt} avec $F\# = 3$ et $R = 25$ mm, en fonction de l'*off-axis* et de Λ , respectivement pour les ordres de diffraction 0 et 1. L'ordre 1 est bien entendu plus critique. Les petites périodes combinées avec de grands décentrages correspondent aux combinaisons les moins favorables.

(d) Compromis

Fort des informations quant aux effets et contraintes des paramètres, nous pouvons établir une approche pour le choix des paramètres optimaux :

1. **Choix de λ_{blaze}** : Le choix est lié au type de réseau utilisé, et a été développé en section 9.2.
2. **Choix de $F\#$** : Les contraintes sur le $F\#$ sont de plusieurs types. Il doit d'abord être le plus petit possible pour réduire l'impact d'une erreur de pointage. Il doit aussi être le plus grand possible pour améliorer l'efficacité de transmission de la lentille. Du point de vue de la maximisation du taux de concentration, la valeur optimale du $F\#$ converge vers 3, ce qui est suffisant pour éviter de trop grandes pertes au niveau de l'efficacité optique ($< 1\%$ par rapport à la valeur convergée même pour un décentrage de 25 mm). La tolérance à l'angle d'incidence devra être vérifiée, mais le $F\#$ de 3 est aussi celui qui donne les plus grandes distances entre les ordres, pour les plus petites dimensions. Cela semble dès lors la valeur la plus adéquate.
3. **Choix du décentrage et de Λ** : La période du réseau et le décentrage de la lentille sont couplés. Les contraintes pour la maximisation de η_{lens}^{opt} favorisent les grandes périodes et les petits décentrages. Cependant, selon la Figure 10.9, ces combinaisons mènent à une superposition des taches focales. C'est donc la tolérance à l'incidence en combinaison avec le graphique 10.9 qui déterminera la combinaison optimale (en vérifiant que les pertes optiques ne sont pas trop importantes). Par exemple, la Figure 10.10(a) définit, pour une tolérance de 0.5° sans pertes, un décentrage

optimal autour de 25 μm , combiné à une période de 20 μm . En section 10.3, nous avons conclu que la période maximale pour une tolérance au dépointage de 1° devait se situer autour de 23 μm . Cependant, cette valeur était une approximation basée sur les rayons passant à l'apex de la lentille. En prenant en compte la géométrie effective de l'élément optique, ainsi que la définition de la tolérance à 90% de la valeur nominale, cette période maximale va évoluer. Elle sera donc différente de nos premières approximations, bien que du même ordre selon la tolérance souhaitée.

10.4.3 Premiers résultats

La Figure 10.12 reprend les densités de puissance dans le plan focal pour une optimisation du concentrateur. Les paramètres choisis dans un premier temps ne tiennent pas compte d'une tolérance à l'angle d'incidence, d'où la proximité des taches focales. Le $F\#$ est fixé à 3, et la période à 34 μm ($> 23 \mu\text{m}$ car il n'y a pas de condition sur la tolérance au dépointage), pour un décentrage de 24 mm.

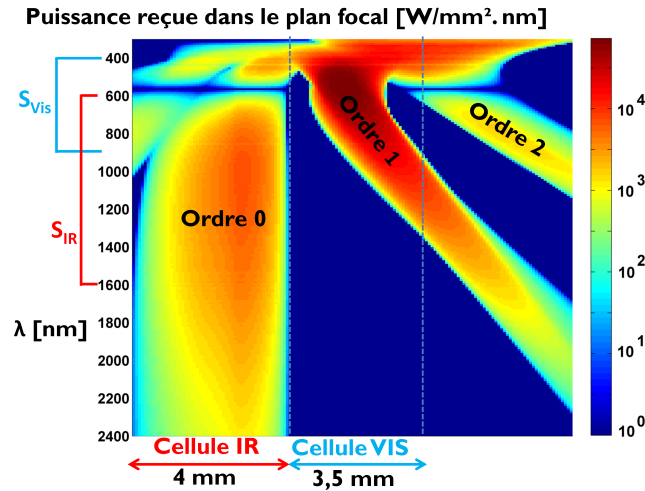


FIGURE 10.12 – Densité de puissance spectrale dans le plan focal en fonction de la position (placement des cellules IR et VIS), et de la longueur d'onde. S_{VIS} et S_{IR} correspondent respectivement aux intervalles spectraux à collecter idéalement sur les cellules VIS et IR. Ce résultat met en évidence à la fois la faisabilité de la séparation spatiale et spectrale entre les deux cellules PV, mais aussi les pertes des grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 non-convertibles par la cellules VIS.

Sur ce graphique, la séparation spectrale et spatiale de la lumière dans le plan focal est nette : le visible est majoritairement focalisé sur la cellule VIS, et le spectre IR sur la cellule IR, comme souhaité. Néanmoins, il est évident qu'il y a des pertes au niveau des grandes longueurs d'onde diffractées au premier ordre, non-convertibles par la cellule VIS et donc perdues... Ceci correspond aux remarques de la section 9.1 où nous avons conclu qu'une optimisation géométrique particulière devrait être appliquée à cette solution blazée pour la rendre optimale. La solution proposée est décrite dans le point suivant.

10.4.4 1^{ère} amélioration du design : configuration symétrique

Pour remédier au problème évoqué ci-dessus, à savoir le gaspillage des $\lambda > \lambda_{\text{end}}^{\text{vis}}$ diffractées à l'ordre 1, mais non-convertibles par la cellule VIS, une amélioration de la configuration de base a été proposée⁴⁵.

Principe

L'idée, illustrée en Figure 10.13, est de placer côte à côte deux éléments optiques symétriques l'un de l'autre. Chaque lentille possède un décentrage égal à son rayon, de sorte que les taches focales à l'ordre 1 respectives des deux éléments se superposent sur la même cellule VIS. Dans cette configuration, les grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 atteignent une cellule IR et sont donc converties. L'autre avantage de ces trois cellules pour deux éléments optiques, est de permettre d'agrandir la cellule VIS sans pour autant décroître le taux de concentration, et donc d'être plus libres aussi pour choisir des combinaisons de paramètres permettant une plus grande distance entre les taches focales et donc une plus grande tolérance à l'angle d'incidence.

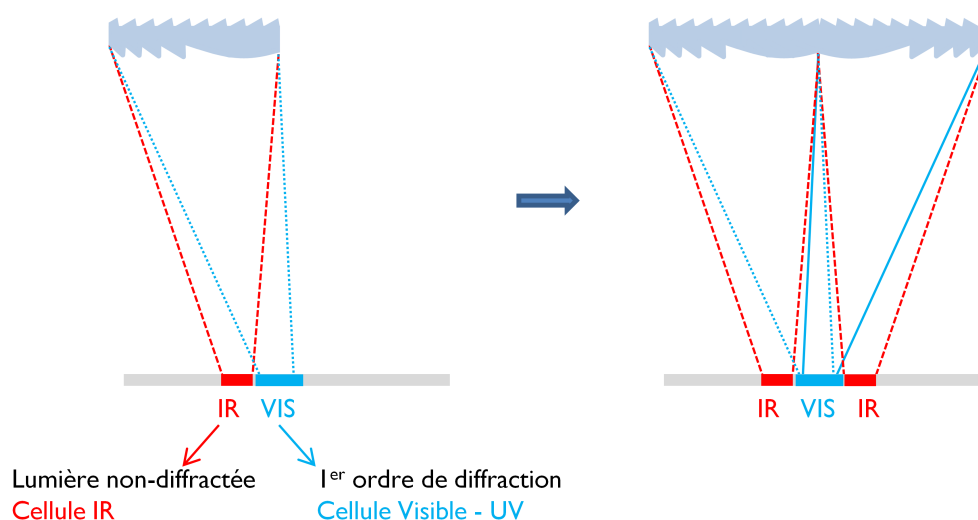


FIGURE 10.13 – Design symétrique du concentrateur blazé : les zones en bleu(/rouge) correspondent à la lumière diffractée à l'ordre 1(/0). En plaçant le symétrique de notre élément optique juste à côté, on superpose les cellules VIS, et on récupère sur une cellule IR la lumière IR diffractée à l'ordre 1 initialement perdue. Il y a donc maintenant 3 cellules pour deux éléments optiques. Le schéma n'est pas à l'échelle.

4. Le concept blazé ainsi que l'approche symétrique pour son optimisation ont fait l'objet d'un poster et d'un article lors d'une conférence internationale : C. Michel, J. Loicq, F. Languy, A. Mazzoli & S. Habraken, *Study of a solar concentrator for space based on a diffractive/refractive optical combination*, AIP Conference Proceedings **1556**, 97-100 (2013), présenté lors de la 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, Miyazaki, Japon, 15-17 avril 2013.

5. La configuration blazée et sa version symétrique ont aussi été publiées dans une revue internationale avec review : C. Michel, J. Loicq, F. Languy & S. Habraken, *Optical study of a solar concentrator for space applications based on a diffractive/refractive optical combination*, Solar Energy Materials & Solar Cells **120**, 183-190 (2014).

Méthode pour l'optimisation

Point de vue design, la méthode développée pour la forme de la lentille (point 10.4.1) est toujours valable, les objectifs et contraintes restant les mêmes. Cependant le décentrage est fixé autour de 25 mm (la valeur précise est déterminée de telle sorte que la tache focale à l'ordre 1 soit symétriquement répartie autour du centre à $R = 25$ mm). La longueur d'onde de blaze et la combinaison de cellules PV, tout comme les paramètres ($F\#$, Λ) doivent être vérifiés et éventuellement adaptés pour tenir compte du gain de lumière sur les cellules IR.

Combinaison (λ_{blaze} , cellules PV) optimale

L'amélioration de la configuration géométrique permettant de collecter et convertir une partie supplémentaire du spectre, modifie la cartographie de la Figure 9.2(a/b), et donc les résultats d'optimisation de la combinaison λ_{blaze} et cellules PV. Il est difficile de savoir exactement où se situe la limite des longueurs d'onde collectées en plus. Mais en faisant une estimation plausible sur notre modèle, la longueur d'onde de blaze optimale est plus courte que précédemment, et les énergies de bandes interdites optimales plus élevées. Un graphique reprenant les cartographies modifiées avec des hypothèses plausibles est repris en Figure 10.14. L'optimum est en effet maintenant dans les environs de $E_{g,0}/E_{g,1} = 0.9/1.65$ eV et $\lambda_{\text{blaze}} = 540$ nm. La configuration finale (séparation réelle des longueurs d'onde) nécessitera sans doute encore une légère adaptation de la longueur d'onde et/ou de la combinaison des cellules.

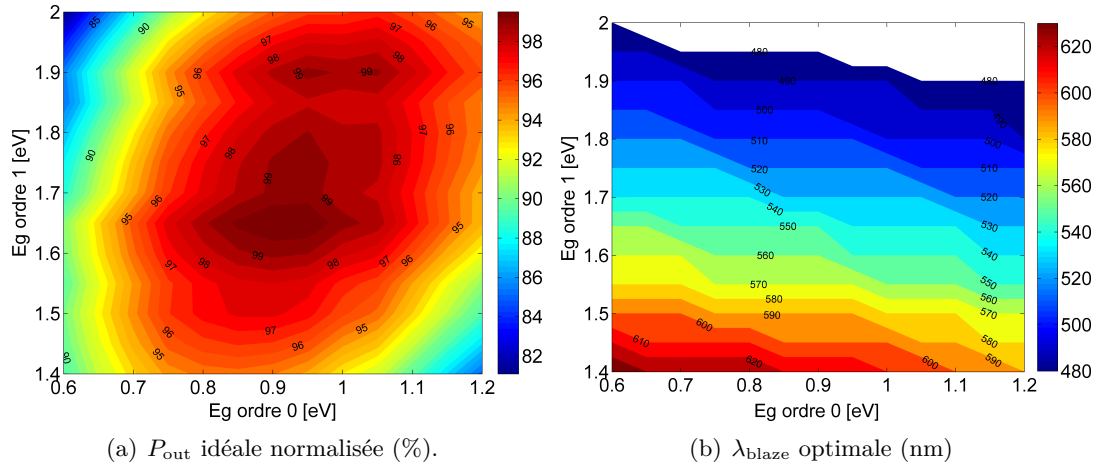


FIGURE 10.14 – Combinaisons optimales de cellules et longueur d'onde de blaze, en tenant compte de la configuration symétrique : l'optimum se situe vers de plus hautes énergies de bande interdite et de plus courtes longueurs d'onde de blaze que précédemment.

Choix du $F\#$

Pour choisir le meilleur $F\#$, considérant un décentrage de 25 mm fixé (soit le rayon de la lentille cf. configuration symétrique), on peut calculer, pour une combinaison de cellules PV données, la somme des dimensions des cellules et la distance séparant les ordres de diffraction, exactement comme en section 10.4.2, mais ici pour 3 cellules PV.

Sur les Figures 10.15(a) et 10.15(b), on a les résultats des dimensions et des distances. Simplement en regardant les résultats de dimensions, on voit que pour une même période du réseau, le $F\#$ de 3 a toujours les plus petites dimensions. Maintenant, en faisant le lien avec les distances nécessaires selon le $F\#$ pour avoir une tolérance à l'angle d'incidence donnée, venant de l'équation (10.8), on obtient les dimensions minimales des cellules pour respecter la contrainte de tolérance. Un exemple de résultat est repris dans la Table 10.1, pour une tolérance de 0.5° : le $F\#$ le plus avantageux demeure autour de 3.

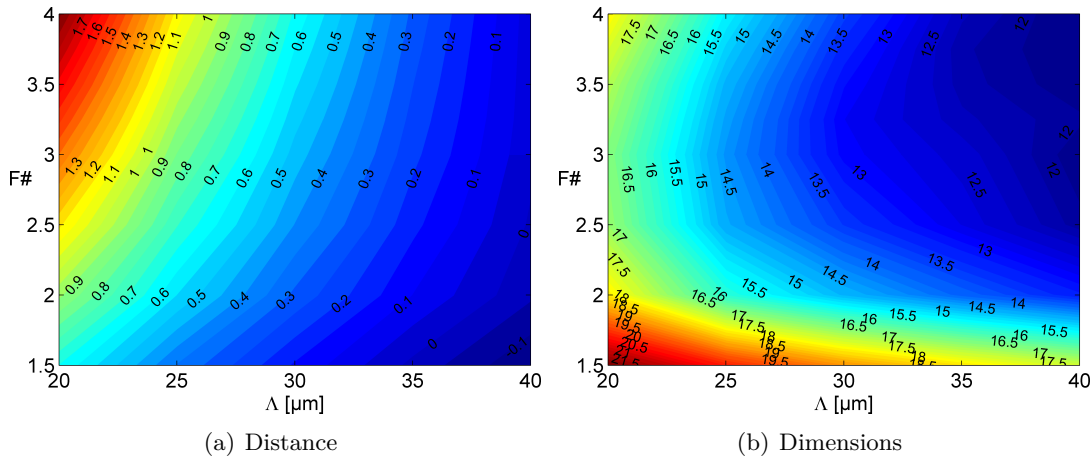


FIGURE 10.15 – (a) Distance entre les ordres de diffraction 0 et 1, et (b) dimension totale des cellules PV, selon le $F\#$ et Λ . Le décentrage est fixé à 25 mm (le rayon de la lentille pour correspondre à la configuration symétrique). La lentille est dessinée pour une combinaison de cellules PV idéales dont les E_g valent 0.9 et 1.65 eV.

$F\#$	Distance minimale [mm]	Dimension totale [mm]
3.5	1.588	17.35
3	1.36	16.8
2.5	1.134	17.08
2	0.9	18.27
1.5	0.68	21

TABLE 10.1 – Pour chaque $F\#$, une distance minimale est attribuée pour ne pas sortir de la cellule à un angle donné, suivant l'équation (10.8) (ici pour l'exemple 0.5°). A cette distance correspond une dimension totale des cellules : le $F\#$ de 3 présente les dimensions les plus petites pour une même tolérance à l'angle d'incidence.

Exemple de résultats

La période choisie est de 20 μm , c'est-à-dire à la période minimale fixée au point 10.3, permettant d'atteindre la plus grande tolérance au dépointage possible. Pour la configuration blazée symétrique avec une période fixe de 20 μm , focalisant sur des cellules idéales de 0.9 et 1.65 eV, on atteint des taux de concentration autour de $9.03\times$ et $17.4\times$ (global $5.95\times$), pour une tolérance $\theta_{90\%} = 0.7^\circ$. Les résultats notamment en termes d'efficacité optique après optimisation et la comparaison entre les différentes configurations seront détaillés au Chapitre 12.

Avantage de la symétrie

Des exemples de densités de puissance dans le plan focal sont repris en Figure 10.16, avec à gauche celle de la configuration non-symétrique et à droite celle pour la configuration symétrique. Pour les besoins de la comparaison, la combinaison de cellules PV et λ_{blaze} n'a pas été modifiée pour la configuration symétrique. L'avantage est mis en évidence sur la figure du bas : les grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 sont maintenant collectées par une cellule IR ! De plus, l'étalement de la cellule VIS et le plus grand décentrage permettent une collection partielle des courtes longueurs d'onde des ordres 2 et 0.

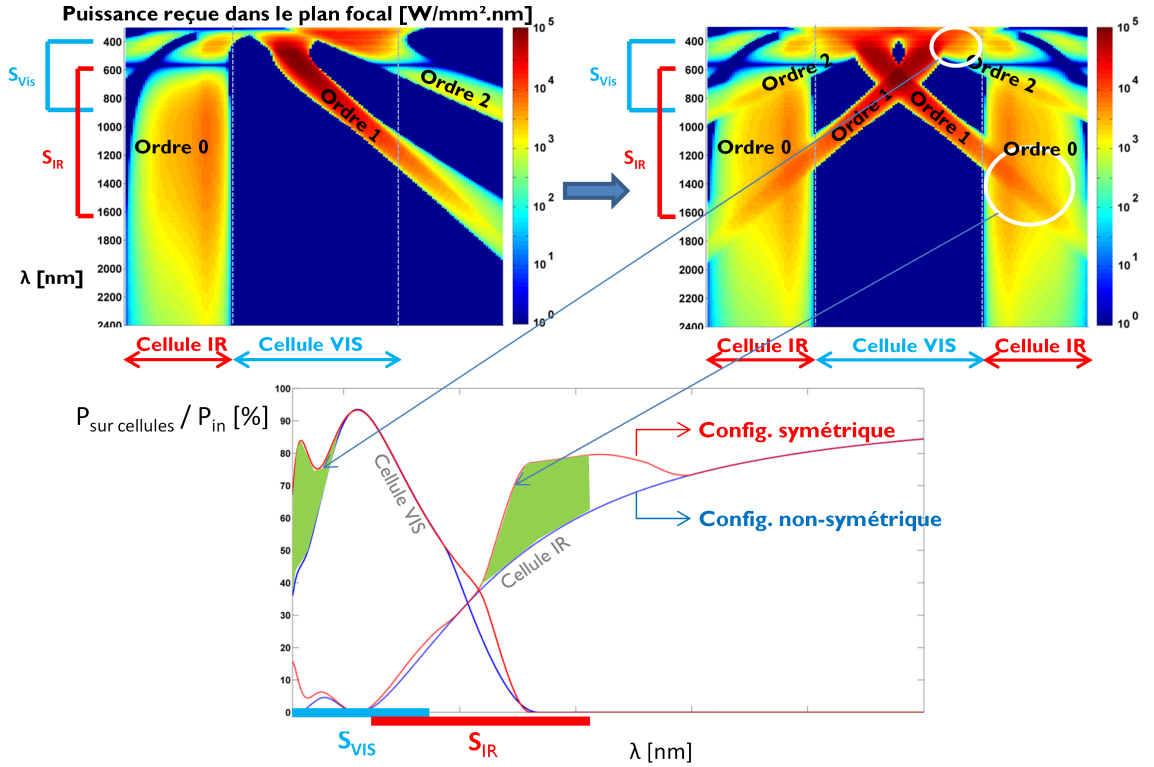


FIGURE 10.16 – Distributions de la densité spectrale dans le plan focal pour les configurations symétrique et non-symétrique. S_{VIS} et S_{IR} correspondent respectivement aux intervalles spectraux à collecter idéalement sur les cellules VIS et IR. L'avantage de la symétrie est mis en évidence par les zones vertes liées aux cercles blancs : les grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 sont collectées par une cellule IR, et une partie de l'ordre 2 est récupérée par la cellule VIS.

Cette symétrie est donc primordiale pour la configuration blazée, car c'est elle qui permet à cette configuration de devenir intéressante par rapport à un concentrateur équivalent focalisant sur une unique cellule SJ. Les résultats seront détaillés dans le Chapitre 12. Plus particulièrement, l'avantage essentiel de la configuration symétrique est flagrant sur la Figure 12.5.

10.4.5 Seconde amélioration du design :

Optimisation de la période en chaque point le long de la lentille

L'ordre 1 focalisant de plus courtes longueurs d'onde que l'ordre 0, le plan comprenant sa plus petite dimension est plus proche de la lentille que celui de la lumière non-diffractée. Ceci avait d'ailleurs mené à une optimisation pour trouver le meilleur plan focal (Figure 10.8). Il serait bien sûr plus optimal que les deux plans focaux idéaux coïncident, permettant d'accroître le taux de concentration global. Dans ce but, un degré de liberté supplémentaire a été ajouté à la configuration symétrique au niveau de la période du réseau de diffraction précédemment fixe le long de la lentille, qui va être optimisée en tout point. Cette modification de période ne va pas jouer sur la lumière non-diffractée, c'est donc le spot à l'ordre 1 qui va être impacté et optimisé.

Deux méthodes principales ont été développées⁶, dont le principe est expliqué en Figure 10.17. La première méthode est basée sur un design symétrique avec une période fixe, qui sera optimisée en un second temps. La seconde méthode part d'une lentille classique optimisée pour la lumière non-diffractée, sur laquelle on dispose l'équivalent d'une lentille diffractive, permettant de dissocier les ordres 0 et 1. Les détails de ces approches sont repris ci-dessous.

Approche 1 : Focalisation dans le plan focal de l'ordre 0

L'idée est de modifier la période du réseau de diffraction le long de la lentille de sorte à focaliser l'ordre 1 et l'ordre 0 dans le même plan focal, comme expliqué en Figure 10.17(a). Le taux de concentration des cellules IR devrait donc augmenter puisque le plan focal effectif se situe au niveau du plan focal idéal du spot non-diffracté. Le taux de concentration de la cellule VIS dépendra des performances possibles, mais les paramètres sont posés pour qu'il ne varie que très peu. La méthode d'optimisation est la suivante, aussi décrite en Figure 10.18 pour un « demi-concentrateur » (sans la partie symétrique) :

1. La lentille est optimisée selon la méthode développée précédemment avec une période fixe. Le plan focal idéal pour la lumière non-diffractée est donc identifiable : le vecteur période sera modifié de sorte à focaliser l'ordre 1 dans ce même plan focal.
2. Les limites de la cellule VIS dans le nouveau plan focal (représentées par les points rouge et bleu de la Figure 10.18) sont choisies de sorte à respecter la distance minimale entre les taches focales imposée par la condition de tolérance aux erreurs de pointage, et de sorte à conserver le même ordre de grandeur au niveau du $C_{\text{géo VIS}}$.
3. En chaque point de la lentille et pour chaque longueur d'onde, on calcule la période nécessaire de sorte que les rayons atteignent respectivement les points rouge et bleu. Ces données définissent les périodes maximales et minimales de sorte à rester dans les limites souhaitées de la tache focale à l'ordre 1. Notons que l'hypothèse d'épaisseur nulle est toujours applicable, et sera vérifiée en fin de section.
4. La période optimale est choisie de sorte que tous les rayons demeurent sur la zone souhaitée (toutes les périodes entre les deux limites peuvent être choisies), mais

6. L'insertion de l'optimisation de la période le long de la lentille, ainsi que la méthode de choix des cellules PV (section 9.2) et l'approche des simulations thermiques, ont mené à une communication orale lors d'une conférence internationale : C. Michel, J. Loicq, T. Thibert & S. Habraken, *Study of a solar concentrator for space based on a diffractive/refractive optical combination*, communication orale et article dans les proceedings lors de la 10th European Space Power Conference, Noordwijkerhout, The Netherlands, 13-17 avril 2014.

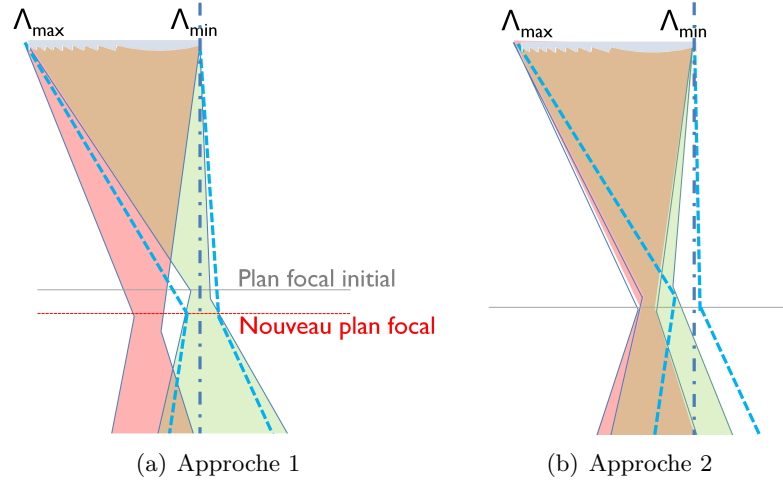


FIGURE 10.17 – Approches pour l’optimisation de la distribution de la période du réseau le long de la lentille. Les zones rouge et verte représentent respectivement les rayons initialement diffractés à l’ordre 0, et à l’ordre 1. Les lignes en bleu correspondent à la lumière diffractée à l’ordre 1 après optimisation. *Approche 1* : A partir d’un élément optique précédemment optimisé avec une période fixe, la distribution du réseau est optimisée pour focaliser la lumière à l’ordre 1 dans le même plan focal que la lumière non-diffractée. *Approche 2* : A partir d’une lentille classique optimisée pour la lumière non-diffractée, un réseau de diffraction optimisé (\equiv lentille diffractive) lui est adjoint de sorte à créer une tache focale dissociée pour la lumière diffractée à l’ordre 1. Sur le schéma, seule une moitié de l’élément optique est représenté, il faut donc y ajouter son symétrique pour avoir le système complet.

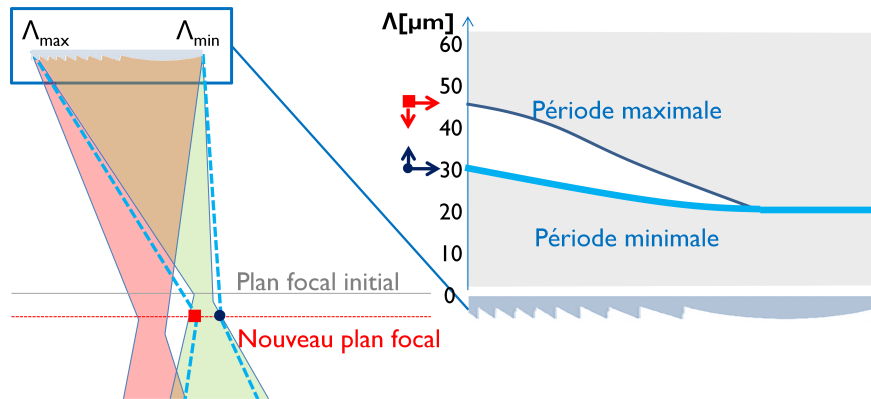


FIGURE 10.18 – Variation optimale de la période le long de la lentille. La période maximale de sorte que toutes les longueurs d’onde d’intérêt atteignent le plan focal à droite du point rouge, correspond à la courbe en bleu foncé. La période minimale de sorte que toutes les longueurs d’onde d’intérêt atteignent le plan focal à gauche du point bleu, correspond à la courbe en bleu clair. Puisque plus la période est petite, plus l’angle de diffraction est grand, la période optimale correspond à la période minimale acceptable, de sorte à demeurer dans la zone souhaitée et maximiser la quantité des grandes longueurs d’onde non-convertibles par la cellule VIS, atteignant la cellule IR voisine. La période est néanmoins toujours limitée à une valeur de 20 μm minimum.

aussi de sorte qu'un maximum des grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 atteignent le bord de la zone et finalement la cellule IR voisine dans la configuration complète. C'est donc au final la plus petite période acceptable (présentant les plus grands angles de diffraction) qui correspond à la solution optimale pour la configuration blazée. La condition la plus restrictive est évidemment la conservation de la distance minimale entre les ordres de diffraction, qui ne peut pas toujours être observée.

Si l'on démarre de la lentille précédemment optimisée avec une période de 20 μm , l'optimisation de la période du réseau améliore les taux de concentration sans modifier ni la tolérance à l'angle d'incidence, ni la puissance de sortie, si le nouveau point dans le plan focal pour l'ordre 1 est dans la continuité de celui initialement dans le plan focal initial, ou à sa droite. Ce qui paraît logique puisque déjà dans le plan initial, l'angle minimal est déterminé par une période de 20 μm . Dans ces conditions limites, on atteint des taux de concentration autour de $12.25\times$ pour la cellule IR, et $12.4\times$ pour la cellule VIS, au lieu de $9.8\times$ et $12.5\times$ ($5.6\times$ globalement) pour la même lentille avec période fixe ⁷. L'amélioration est déjà notable.

Si par contre on se place dans le plan focal idéal, sans tenir compte de cette limite, alors la période idéale passe sous la limite des 20 μm , comme l'illustre l'exemple en Figure 10.18, et la tolérance à l'angle d'incidence diminue selon l'importance de ce recouvrement, ou les dimensions de l'ordre 1 augmentent. Pour solutionner ce problème, deux approches sont possibles :

1. L'utilisation d'une lentille optimisée de base pour une période plus grande, ce qui va permettre d'utiliser des périodes plus petites mais supérieures à 20 μm .
2. La modification du profil de la lentille au niveau de la zone posant le problème de recouvrement.

L'usage d'une lentille optimisée pour une période plus grande a aussi pour effet d'accroître le taux de focalisation à l'ordre 0 initialement, puisque pour une plus grande période, les angles de diffraction à focaliser sont plus petits et donc mieux en accord avec ceux à l'ordre 0. C'est donc cette solution qui a été retenue. Les résultats donnent, pour une période de 50 μm , des taux de concentration de $16\times$ et $12.55\times$ ($7\times$ globalement), ce qui est meilleur qu'avant, comme prévu. Les courbes de périodes sont reprises en Figure 10.19. Cependant, les taches focales étant plus étroites et concentrées dans cette configuration, la sensibilité à l'angle d'incidence sera accrue, et ce, d'autant plus que la période de design de la lentille est élevée. Dans le cas présent, on perd environ 0.05° de tolérance. Il est néanmoins possible d'ajuster la configuration pour récupérer la tolérance initiale de 0.7° : on obtient alors un taux de concentration global de $6.85\times$ (12 et $16\times$).

Ces résultats dépendent de la combinaison de cellules PV choisie, et donc des intervalles spectraux qui interviennent : les résultats pour une optimisation avec des cellules PV idéales ou réalistes seront donc différents.

Remarquons que si le choix se porte sur la plus grande période accessible (au lieu de la plus petite comme illustré en Figure 10.18), la puissance à incidence normale est inférieure aux cas précédents puisque le recouvrement des grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 avec la cellule IR voisine est moins grand. Dans le cas étudié, la différence au

7. Configuration optimisée pour des cellules PV réalistes GaAs et InGaAs, correspondant à la configuration étudiée dans la section 12.3.

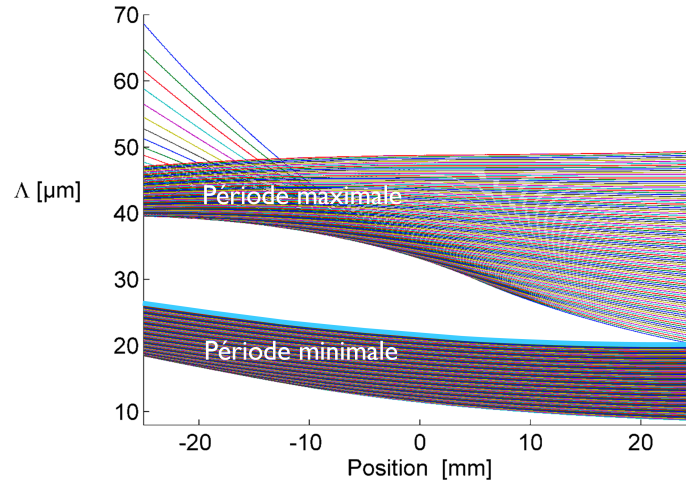


FIGURE 10.19 – Périodes permises pour respectivement atteindre les points rouge et bleu, dans le cas d’une lentille optimisée initialement pour une période de $50\ \mu\text{m}$. Les courbes ne se superposent pas, respectant les consignes données. Le choix de la plus petite période permise donne une meilleure collection par la cellule IR des grandes longueurs d’onde diffractées à l’ordre 1 : la courbe optimale est donc celle surlignée en bleu clair.

niveau de la puissance de la cellule IR est autour d’un facteur de 1.15. Ceci est illustré par la Figure 10.20.

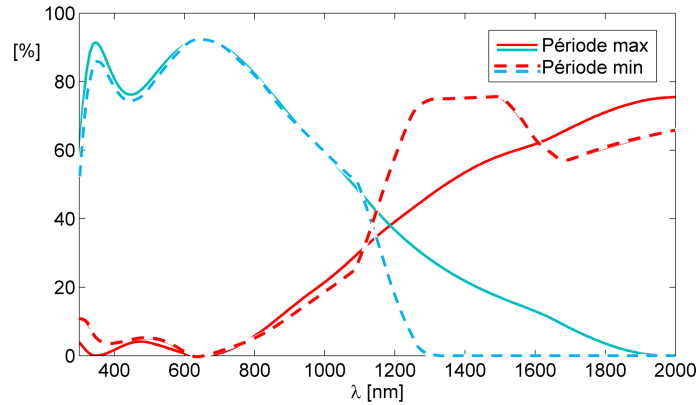


FIGURE 10.20 – Fraction de la lumière incidente parvenant sur les cellules IR (rouge) et VIS (bleu) selon le choix de la période maximale ou minimale permise. L’utilisation d’une petite période dans cette configuration blazée améliore la séparation spectrale, rendant la transition spectrale beaucoup plus abrupte.

Approche 2 : A partir d’une lentille optimisée pour l’ordre 0

Le design sur base d’une lentille classique semble le plus évident et simple : la lentille focalise l’ordre 0, et le réseau optimisé agit comme une lentille diffractive qui focalise l’ordre 1. Cette solution va par ailleurs dans le même sens que l’utilisation d’une lentille optimisée pour une grande période, comme dans le point précédent.

La lentille optimisée pour l’ordre 0 est ici développée à partir de la méthode en Annexe

J.1, avec un décentrage tel que l'ordre 1 au final se trouve autour des 25 mm. Mais elle pourrait aussi être adaptée à une lentille du commerce. La méthode d'optimisation est alors la même que pour l'approche 1 : pour chaque point de la lentille, on détermine les périodes minimales et maximales pour que tous les rayons d'intérêt se situent entre les limites souhaitées de la cellule. Un résultat de période est repris en Figure 10.21. Avec cette courbe, on obtient des taux de concentration autour de $17.8\times$ et $12.5\times$, pour une tolérance à l'angle d'incidence réduite d'environ 0.1° à cause du plus grand taux de concentration. La tolérance est encore fortement liée à la distance entre ordres. Si l'on veut l'augmenter, les périodes diminuent et descendent sous les $20\ \mu\text{m}$. La marge est un peu plus souple avec l'approche 1, avec laquelle on peut choisir de réduire les taux de concentration pour gagner un peu en tolérance. Notons que ces méthodes sont à choisir et adapter en fonction de la combinaison de cellules PV choisie.

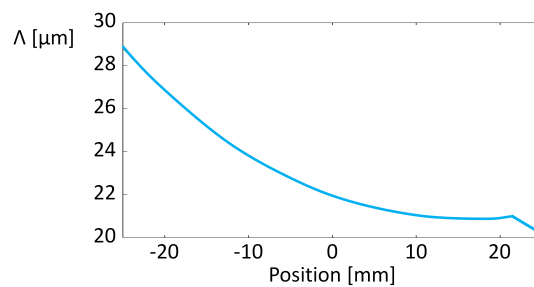


FIGURE 10.21 – Périodes optimisées le long de la lentille (largeur totale = 50 mm) avec la seconde approche.

Vérification de la méthode de simulation

La méthode de simulation présentée en section 10.2 est basée sur le fait que le réseau possède une période uniforme, et donc que tout point de la lentille (face de sortie de l'élément optique) reçoit la même distribution d'angle d'incidence selon la longueur d'onde et l'ordre de diffraction. Ceci permet de supprimer l'effet de l'épaisseur de l'élément optique. Cependant, si la période du réseau n'est pas uniforme le long de la lentille, les angles reçus seront différents en chaque point de la face de sortie. Une vérification de l'hypothèse d'épaisseur nulle est donc requise et a été réalisée. Les résultats sont repris en Annexe J.2, incluant la méthode de simulation de la période variable dans ASAP[®], et démontrant la validité de l'hypothèse.

Remarque

Il est plus simple et moins coûteux d'utiliser un réseau de diffraction à période fixe du commerce, combiné avec une lentille de Fresnel optimisée. Cependant, la solution de la variation de la période du réseau est aussi intéressante. Sur la face avant, elle implique un second moule « free-form », mais il pourrait tout aussi bien être couplé directement avec la lentille de Fresnel (cf. Annexe F), n'impliquant donc plus qu'un unique moule. De plus, cette solution aurait l'avantage de laisser la surface avant plane et donc de simplifier la pose et l'accroche d'une éventuelle couche anti-reflet ou anti-UV.

10.4.6 Concentrateurs secondaires

Le problème majeur du concentrateur proposé est sa tolérance à l'angle d'incidence. Cependant, principalement dans sa configuration symétrique, c'est la distance entre les ordres de diffraction qui définit cette tolérance, et non pas la distance de sécurité placée sur les bords. Il faut donc empêcher les deux ordres de changer de cellule dans le plan focal.

Au niveau des concentrateurs secondaires, nous avons premièrement étudié simplement des miroirs placés de part et d'autre du concentrateur (Figure 10.22), permettant de réduire les dimensions des cellules sur les bords, et aussi de récupérer l'ordre 2, dans l'hypothèse d'une configuration non-symétrique. Cependant, l'avantage de la collection de l'ordre 2 est un peu contre-balançé par les pertes en réflexion au niveau des miroirs, n'améliorant l'efficacité optique que d'1% au final. Au niveau de la tolérance au dépointage, les miroirs de bords ne changent presque rien, puisqu'elle est toujours principalement définie par la distance entre les ordres. C'est donc surtout le choix de la période qui définira cette tolérance, et les miroirs ne peuvent qu'améliorer le taux de concentration dans le cas où la période nécessaire mènerait à de trop grandes taches focales.

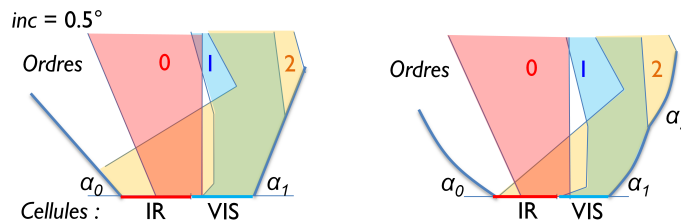


FIGURE 10.22 – Configurations de miroirs secondaires étudiées. *Gauche* : La configuration comprend simplement des miroirs plans, placés de sorte à conserver tout l'ordre 1/0 sur la cellule VIS/IR même en cas de dépointage. *Droite* : La seconde configuration ajoute une optimisation tout le long du miroir, à la fois pour collecter l'ordre 1/0 sur la cellule VIS/IR même avec dépointage, mais en plus pour collecter l'ordre 2 entièrement sur la cellule VIS, ce qui augmente un peu les performances. Les résultats des deux configurations sont néanmoins assez proches. Cependant, même si cela permet de réduire les dimensions du bord des cellules PV et d'améliorer un peu la tolérance à l'incidence, le problème principal dû à la distance entre les cellules PV demeure. C'est en effet du passage d'une cellule à l'autre lors du dépointage que proviennent les pertes principales, et les miroirs aux extrémités n'y changent rien.

L'autre solution qui a été abordée est de poser des miroirs entre les cellules. Mais la faible distance entre les taches focales, et la limite de hauteur pour éviter de faire de l'ombrage à la cellule voisine, limitent les dimensions et inclinaisons des miroirs qui deviennent très petits et n'ont pas vraiment la capacité d'améliorer la tolérance à l'angle d'incidence. De plus, ces miroirs supprimeraient l'avantage de la configuration symétrique ! Puisqu'alors les grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 seraient en grande partie réfléchies par le miroir et rabattues sur la cellule VIS. Des miroirs au centre n'auraient donc pas de sens dans cette configuration. Une approche réfractive est bien sûr aussi possible. Cependant, cela apporte soit une masse conséquente supplémentaire dans le cas d'un élément en une pièce, soit une structure supplémentaire à déployer à un autre niveau, et des pertes optiques aux interfaces. La solution sans concentrateurs secondaires étant acceptable telle quelle géométriquement, l'option de concentrateurs secondaires a été écartée.

10.5 Développement de la configuration lamellaire

Les sections 9.1 et 9.3 ont montré l'avantage potentiel de l'usage d'un réseau de diffraction lamellaire symétrique au lieu d'un réseau blazé point de vue séparation spectrale. Cependant, par définition, ce type de réseau est symétrique, et possède donc trois ordres de diffraction à collecter dans notre cas : les ordres 0 et ± 1 . La focalisation de trois ordres de diffraction avec des directions différentes implique des zones de focalisation difficiles à minimiser et donc finalement fortement étalées, résultant en un faible taux de concentration. Le développement de la configuration symétrique (point 10.4.4) est donc primordial pour l'utilisation de réseaux lamellaires : elle superpose les ordres de deux éléments optiques symétriques, de sorte à accroître le taux de concentration et permet finalement au concept avec réseau lamellaire d'être potentiellement intéressant, même du point de vue géométrique.

La géométrie du concentrateur est donc au final très proche de celle développée au point 10.4.4, mais avec les ordres de diffraction différemment répartis : la lumière non-diffractée des deux lentilles est focalisée sur la cellule centrale, tandis que la lumière diffractée à l'ordre 1 par la lentille de droite, est focalisée sur la même cellule que la lumière diffractée à l'ordre -1 par la lentille de gauche, et vice versa. La Figure 10.23 reprend un schéma de cette configuration^{8 9}. La difficulté majeure pour l'optimisation est de focaliser à la fois l'ordre 1 et l'ordre -1, qui sont diffractés par définition dans des directions opposées.

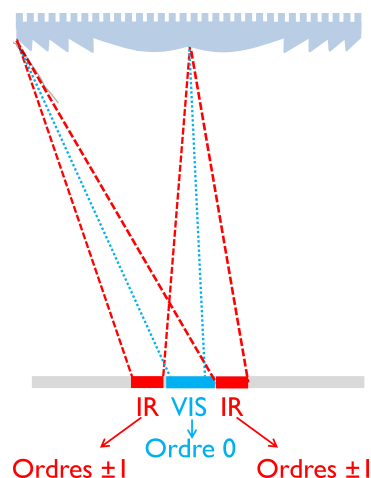


FIGURE 10.23 – Schéma de principe de la configuration lamellaire : les ordres de diffraction ± 1 provenant respectivement des parties droite/gauche sont focalisés sur les mêmes cellules PV (cellules IR). L'ordre 0 de l'ensemble atteint la cellule VIS centrale.

8. Cette nouvelle configuration ainsi que les justificatifs du choix des réseaux et des cellules (sections 9.1 et 9.2), et la comparaison des résultats théoriques et expérimentaux (section 17.4.3), ont fait l'objet d'un poster et d'un article dans les proceedings d'une conférence internationale : C. Michel, J. Loicq, T. Thibert & S. Habraken, *Optical Study of a Spectrum Splitting Solar Concentrator based on a Combination of a Diffraction Grating and a Fresnel Lens*, poster et article dans les proceedings de la 11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, Aix-les-Bains, France, 13-15 avril 2015.

9. De même, ceci a mené à la publication d'un article dans une revue internationale avec review : C. Michel, J. Loicq, T. Tanguy & S. Habraken, *Optical study of diffraction grating/Fresnel lens combinations applied to a spectral splitting solar concentrator for space applications*, *Applied Optics* **54**(22), 6666-6673 (2015).

Design de la lentille

La méthode de design à période fixe de la section 10.4.4 a été un peu adaptée pour inclure la présence des trois ordres de diffraction : on optimise toujours la focalisation de l'ordre 1, mais le plan focal optimal est celui donnant les distances entre ordres les plus identiques possible, de sorte à optimiser leur superposition. Néanmoins, l'ordre -1 sera alors plus dispersé que l'ordre 1.

Précédemment, nous avions le choix de la dimension de la cellule centrale, mais ici, elle est déterminée directement par le réseau. Nous avons alors le choix de superposer chaque ordre (centrage par rapport aux ordres ± 1), ou de les décaler, pour étaler les taches et éventuellement réduire la sensibilité à une erreur de pointage (centrage autour de l'ordre 0), mais d'une efficacité à incidence nulle un peu inférieure. Deux exemples sont repris en Figure 10.24. Dans la suite, c'est la solution centrée sur les ordres ± 1 qui est choisie.

Ce qui demeure identique par rapport à la configuration blazée, c'est la diminution de la distance entre ordres et leur superposition lorsque la période est trop grande. De la même façon qu'avant, pour la période fixe, nous sommes donc limités à des périodes autour de $20\text{ }\mu\text{m}$ (l'équation de diffraction demeurant la même), mais à adapter selon les EQEs des cellules PV.

Au niveau du $F\#$, une approche semblable à celle décrite sur base de la Figure 10.15 a été réalisée, avec des résultats similaires : l'optimum se situe entre des $F\#$ de 2.5 et 3, avec un avantage pour le $F\#$ de 3 point de vue tolérance à l'angle d'incidence. Ici, nous utiliserons donc un $F\#$ de 3, facilitant de plus la comparaison avec la configuration blazée.

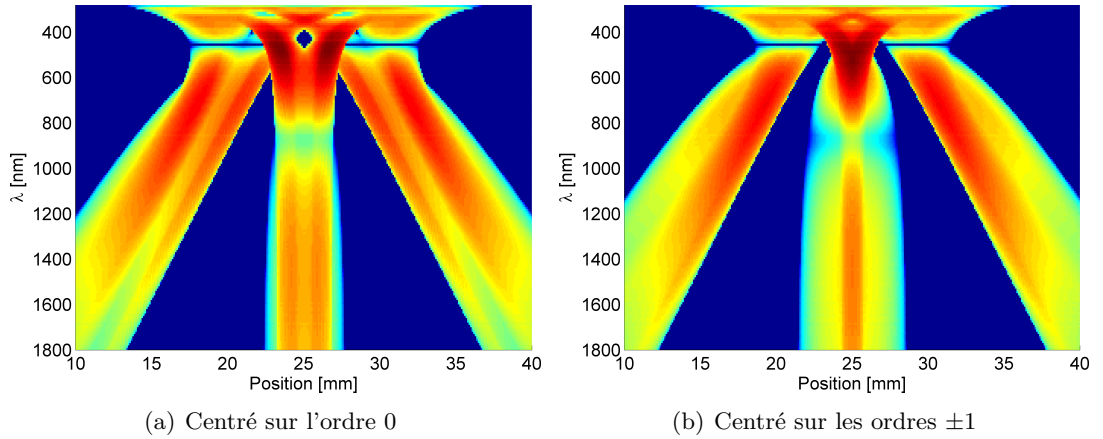


FIGURE 10.24 – Simulation du flux de lumière parvenant dans le plan focal pour deux configurations à période fixe ($20\text{ }\mu\text{m}$), respectivement centrées autour des dimensions de l'ordre 0, ou des ordres ± 1 .

Après optimisation avec une période de $20\text{ }\mu\text{m}$ pour des cellules PV idéales, on atteint des taux de concentration autour de $6.23\times$ et $11.79\times$ (global $4.08\times$), pour une tolérance à l'angle d'incidence d'environ 0.95° . Les taux de concentration sont inférieurs à ceux de la configuration blazée, principalement à cause de la taille des ordres de diffraction ± 1 . Pour réduire les dimensions des cellules, il faut augmenter la période du réseau, mais alors la distance entre ordres est réduite, de même que la tolérance à l'incidence.

Optimisation de la période du réseau le long de la lentille et exemple de résultat

Comme pour la configuration blazée, il est envisageable d'optimiser la distribution de période le long de la lentille de sorte à accroître le taux de concentration global. Cependant, le principe est ici un peu différent de celui appliqué pour la configuration blazée : il n'est plus question de réduire la tache à l'ordre 0 en se plaçant dans son plan focal, mais simplement de réduire la dimension des taches focales aux ordres ± 1 . De même, il n'y a pas non plus de condition pour maximiser la quantité de lumière IR diffractée à l'ordre 1 et collectée par la cellule voisine, ici la répartition spectrale n'a lieu que par la courbe d'efficacité de diffraction, qui a déjà démontré son efficacité en section 9.3.

La condition d'optimisation de la période correspond donc pour la configuration lamellaire à la période maximale (angles de diffraction minimaux) permettant de conserver une distance suffisante entre les ordres dans le plan focal.

Les deux vecteurs périodes correspondant aux ordres ± 1 (dans le spectre d'intérêt) respectent une distance d fixée par rapport aux bords de l'ordre 0 : l'ordre 1 à droite, et l'ordre -1 à gauche. On obtient alors les périodes maximales que l'on peut avoir pour conserver une distance suffisante entre ordres. La période finale est alors la période minimale permise par les deux vecteurs période. Un exemple d'optimisation est repris en Figure 10.25.

Comme précédemment, il est aussi possible de partir d'une forme de lentille optimisée pour l'ordre 0, ou pour l'ordre 1 avec différentes périodes de base. Le choix n'est pas direct, permettant de choisir des configurations plus étalées, moins sensibles aux erreurs de pointage mais moins performantes de base, ou l'inverse. Le choix de cellules PV et donc des spectres à collecter influence aussi les paramètres optimaux. Les tendances sont cependant les suivantes, pour une tolérance de 0.7° (comparable aux résultats de la configuration blazée) : sans optimisation de la période le long de la lentille, le taux de concentration global demeure autour de $5.5\times$ (avec une période de $27\text{ }\mu\text{m}$). Avec l'optimisation de la période, le taux de concentration global augmente légèrement jusqu'à $5.64\times$. Tout dépend des contraintes que l'on veut atteindre au niveau des taux de concentration, de la tolérance à l'angle d'incidence, et des cellules PV que l'on souhaite utiliser.

En Figure 10.26, est représentée la densité de puissance parvenant dans le plan focal selon la longueur d'onde et la position. Comparativement à la Figure 10.24(b), on observe bien le rabattement spatial des ordres ± 1 . Si l'on veut améliorer la tolérance, il faut appliquer une distance supérieure dans le modèle. Ceci est tout à fait possible, jusqu'à atteindre la configuration à $20\text{ }\mu\text{m}$.

Les dimensions des cellules de côté sont difficiles à réduire à cause de la superposition des ordres 1 et -1. Des miroirs secondaires placés aux bords pourraient corriger un peu ce défaut, mais c'est à contrebalancer avec les désavantages que cela engendre, comme la complexité, masse supplémentaire, réflectivité non-idéale, etc. Notons que la proximité des spots permet de collecter sur la cellule centrale les courtes longueurs d'onde diffractées aux ordres ± 1 .

Comparativement avec la configuration blazée, la plus grande différence réside dans l'utilisation de cellules à plus grandes bandes interdites (cf. section 9.2), et donc dans des spectres plus proches et moins étalés. Les dimensions des cellules sont par ailleurs ici am-

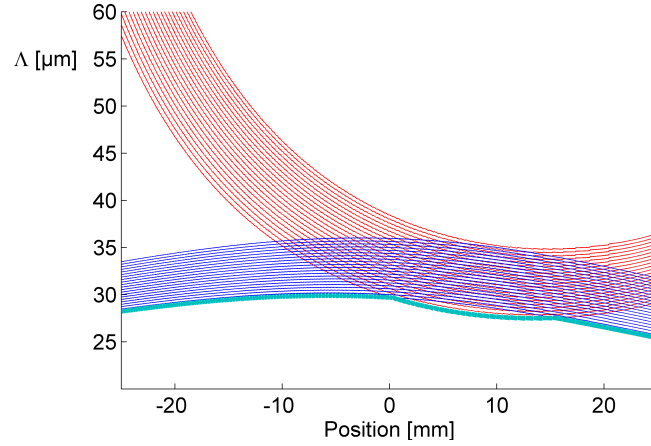


FIGURE 10.25 – Vecteur période optimisé le long de la lentille pour la configuration lamellaire, à partir d’une période de $20\ \mu\text{m}$ pour le design de la lentille. Les courbes rouges correspondent à l’ordre -1, et les courbes en bleu foncé à l’ordre +1. Chaque courbe correspond à une des longueurs d’onde à collecter. Le vecteur période final est surligné en bleu clair : c’est l’enveloppe minimale des périodes maximales permettant de conserver la distance désirée entre les ordres 0 et ± 1 .

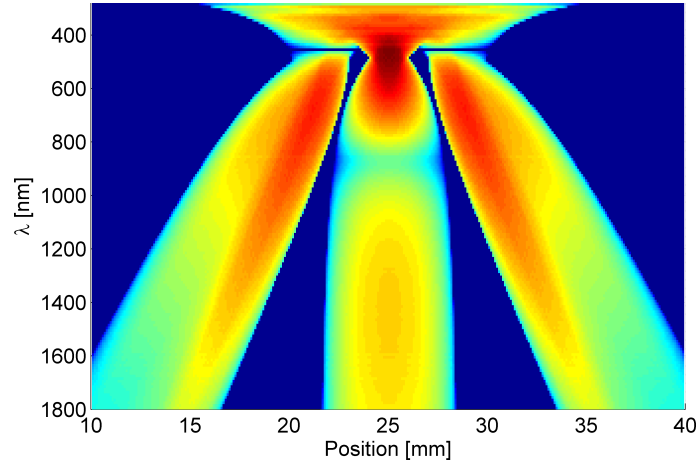


FIGURE 10.26 – Densité de puissance reçue dans le plan focal pour la configuration lamellaire optimisée avec une variation de période le long de la lentille. L’échelle est logarithmique.

plifiées par l’usage des ordres de diffraction opposés ± 1 . Une comparaison effective entre la configuration blazée et lamellaire ne peut donc se faire qu’en fonction des cellules utilisées. Les résultats après optimisation et la comparaison entre les différentes configurations seront détaillés au Chapitre 12.

10.6 Conclusions

Dans le chapitre précédent (Chapitre 9), nous avons montré qu'un réseau de diffraction est capable de séparer spectralement la lumière de façon cohérente avec un objectif de conversion par deux types de cellules SJ différents. Le profil lamellaire était a priori le plus adéquat. Dans ce chapitre, nous nous sommes alors attachés à étudier le comportement géométrique que pourraient avoir de tels concentrateurs, dans le but de tester les possibilités de taux de concentration et tolérances à un angle d'incidence que l'on peut attendre de ces combinaisons lentilles de Fresnel/réseau de diffraction en relief de surface.

Nous avons ainsi développé en premier lieu la configuration blazée, correspondant au design initialement imaginé : un réseau simplement au-dessus d'une lentille de Fresnel. Cette étude a permis de comprendre le comportement géométrique de la lumière au travers de cet élément optique, et de développer une méthode de design d'un profil de lentille adapté. Déjà, la faisabilité d'une séparation spatiale entre les ordres 0 et 1 était mise en évidence. Cependant, comme attendu (cf. section 9.3), la séparation spectrale n'est pas idéale et de larges pertes dans les grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 nous ont amenés à développer une autre configuration : la configuration symétrique. Cette solution a permis de réduire les pertes, et a démontré des taux de concentration jusqu'à $5.6 \times$ pour la somme des trois cellules. Après optimisation de la période du réseau, ce taux de concentration a pu être accru jusqu'à $\sim 7 \times$. La tolérance à l'angle d'incidence pour ces valeurs est au-dessus de $\pm 0.7^\circ$, ce qui reste acceptable. L'ajout de concentrateurs secondaires n'a pas apporté d'amélioration aux résultats.

De même, la configuration lamellaire a été testée et optimisée sur base des méthodes développées pour la configuration blazée, avec quelques adaptations. Bien que plus compliquée à optimiser à cause des trois ordres de diffraction, le principe de symétrie introduit pour la configuration blazée permet ici d'obtenir des taux de concentration de l'ordre de $4.1 \times$ globalement, pour une tolérance à l'incidence de $\pm 0.95^\circ$. Le taux de concentration peut être augmenté moyennant une optimisation de la période le long de la lentille, mais au détriment de la tolérance aux erreurs de pointage (jusqu'à $5.6 \times$ pour $\theta_{90\%} = 0.7^\circ$).

La grande différence entre les configurations blazée et lamellaire réside dans le fait que pour la première, c'est une combinaison de l'efficacité de diffraction et de la configuration géométrique (symétrique) qui définit la puissance de sortie, tandis que pour la seconde, seules les caractéristiques spectrales du réseaux sont importantes. Leurs principes d'optimisation sont donc différents, ce qui explique entre autres les différences de résultats.

Le choix des paramètres a été fait en fonction des aspects géométriques, mais aussi de l'efficacité de transmission optique. Ainsi, l'option de $\Lambda > 20 \mu\text{m}$, d'un décentrage autour de 25 mm (cf. configuration symétrique), et un $F\#$ de 3, permet de réduire les pertes optique de la lentille à moins de 1% de la valeur idéale (décentrage nul, grand $F\#$), et les pertes d'efficacité de diffraction à moins de 2% de la valeur de la théorie scalaire.

Grâce aux méthodes d'optimisation développées dans ce chapitre et le précédent, nous établirons dans le Chapitre 12 les paramètres finaux des deux configurations selon les cellules PV choisies, et analyserons et comparerons les résultats des deux configurations en termes d'efficacité optique et de puissance de sortie.

Notons que pour éviter la texturisation de deux surfaces complexes, et faciliter la combinaison avec un revêtement anti-reflets ou anti-UV, les profils du réseau et de la lentille de Fresnel peuvent être superposés à l'arrière de l'élément optique moyennant de faibles modifications, laissant la face avant plane et libre pour un revêtement notamment.

Chapitre 11

Résultats thermiques

Comme expliqué dans le Chapitre 7, le mode de dissipation de chaleur par convection n'a pas lieu dans l'espace. Il est dès lors très difficile de dissiper la chaleur notamment des cellules PV où des points chauds et finalement des dégradations pourront apparaître. C'est d'autant plus critique que le rendement des cellules PV se dégrade fortement avec la température. La concentration solaire, loin d'améliorer ce point, peut cependant être contrôlée pour éviter des pertes trop conséquentes. C'est pour cette raison qu'un modèle thermique (par ESATAN[®]) a été réalisé : il va nous permettre de calculer une température maximale au niveau des cellules PV, de sorte à valider ou non la viabilité thermique du concentrateur, dépendant principalement des taux de concentration. Le panneau choisi et les principes des simulations ont déjà été décrits en sections 7.2 et 7.3. Dans ce chapitre, nous nous attacherons simplement à décrire les résultats obtenus selon les configurations.

11.1 Concentrateurs avec séparation spectrale

Pour les simulations ici présentes, nous avons pris les modèles de concentrateurs blazé et lamellaire symétriques, couplés avec des cellules PV réalistes proches des combinaisons optimales : GaAs et InGaAs pour la configuration blazée, InGaP et Silicium pour la configuration lamellaire.

Les configurations décrites sont celles du chapitre suivant (en section 12.3). Les résultats thermiques ne sont cependant pas extrêmement sensibles aux faibles variations de paramètres de design, pour une configuration donnée combinée aux mêmes cellules PV.

Pour les simulations thermiques, nous avons besoin du rendement des cellules PV, et inversement. Ainsi, c'est suivant un processus itératif que nous avons atteint les températures de convergence : les Chapitres 11 et 12 sont donc inter-dépendants.



Résultats

Les résultats des simulations donnent des températures de cellules très proches pour toutes les configurations blazées, différentes par contre de celles de la configuration lamellaire :

- **Configuration blazée** : la température maximale des cellules IR se situe autour de 68°C , pour 72°C au niveau de la cellule VIS, comme l'illustre la Figure 11.1. La lentille est quant à elle à une température autour de 8°C .
- **Configuration lamellaire** : les températures sont légèrement inférieures, avec 65°C sur la cellule centrale (cellule VIS) et 61°C sur les cellules externes (cellules IR). La lentille se situe autour de 4°C .

Cette gamme de températures est assez usuelle pour les panneaux solaires, nous confirmant que les taux de concentration obtenus ne sont pas excessifs, le système est donc thermiquement viable.

Notons que même si le modèle simule un panneau infini et qu'il n'y a pas de montants liant la lentille aux cellules, le modèle et ses résultats demeurent cohérents et devraient donner une température théoriquement maximale des cellules. Par ailleurs, outre les cellules PV, la lentille peut aussi causer problème, notamment à des températures trop basses. En effet, le silicone a une plage de fonctionnement nominal allant de -65 à 200°C . Au milieu d'un panneau infini, la température se situe entre 4 et 8°C . Mais en bord de panneau, elle peut descendre à près de -40°C d'après nos simulations. Cette température demeure heureusement supérieure à la température critique du silicone. Ce point reste cependant à surveiller lors d'une simulation plus précise du panneau.

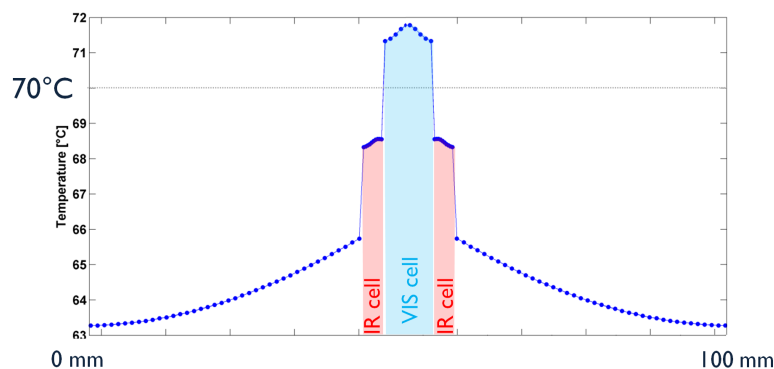


FIGURE 11.1 – Températures calculées à la surface du panneau solaire et au niveau des cellules PV, pour la configuration blazée.

11.2 Panneaux plans/concentrateurs sans séparation spectrale

Pour établir par la suite une comparaison des résultats avec un panneau plan couvert de cellules PV, et un concentrateur classique focalisant sur une unique cellule, leurs simulations thermiques ont aussi été réalisées :

- **Concentrateur simple** : Les résultats de la simulation du comportement thermique d'un concentrateur (une lentille de Fresnel) focalisant sur une mono-jonction GaAs (simulée avec la même méthode que nos cellules SJ), avec un taux de concentration de $11\times$ (c.-à-d. pour une tolérance à l'angle d'incidence d'environ 0.85°), donnent des températures entre 80 et 84°C . Le même concentrateur focalisant sur une cellule MJ atteint $74\text{-}76^\circ\text{C}$.

Les différences de températures avec les concentrateurs à séparation spectrale proviennent en partie de la répartition sur la largeur de deux cellules au lieu d'une (taux de concentration deux fois moins grand, qui justifie une réduction de température autour de 5°C). Dans le cas de la cellule GaAs seule, le spectre non-convertible participe au reste de l'échauffement de la cellule, alors qu'avec la séparation spectrale, la partie non-convertible du flux parvenant sur une cellule est largement réduite. La plus grande gamme de longueurs d'onde convertibles par les MJ explique leur température plus basse.

- **Panneau plan** : En ce qui concerne les panneaux plans, une température d'environ 55°C est calculée avec des cellules SJ, et 48°C avec des cellules MJ.

11.3 Influence des hypothèses

Comme précisé auparavant, ce modèle n'a pas l'ambition de donner une température réellement attendue en mission. Le modèle se doit d'être simple, mais suffisamment précis pour rester cohérent par rapport à notre situation. Cependant, les résultats de température sont très dépendants des caractéristiques du panneau choisi. Ainsi, selon celles-ci, les différences entre les configurations pourraient être plus ou moins marquées (panneau plus ou moins conducteur).

Caractéristiques importantes au niveau du panneau

Les paramètres importants sont les suivants :

1. La colle entre les cellules et le panneau : une conductivité supérieure à 0.4 est nécessaire si l'on souhaite avoir moins de 2°C de différence avec la meilleure colle.
2. La conductivité des fibres est très importante : elle permet d'étaler au mieux la chaleur le long du panneau. Par exemple, un panneau avec les fibres M55J ($k = 1/4.k_{\text{K13C}}$), donne lieu à une différence de température entre le maximum de la cellule centrale et le panneau de l'ordre du double de celle avec les fibres à haute conductivité (K13C), soit près de 20°C au lieu de 10°C . Dans ce cas, la différence est aussi due au nombre de couches de fibres, qui passe de 2 à 9 pour le cas le plus conducteur.
3. La nature du revêtement placé sur le panneau entre les cellules, est aussi importante. C'est en effet elle qui réémet la chaleur vers l'extérieur, et empêche l'absorption de

la lumière parasite. Des deux, c'est principalement l'émissivité qui est primordiale. Il faut alors viser des valeurs assez élevées (> 0.8). Une différence d'absorption entre 0.2 et 0.4 par exemple, donne lieu à une différence de température de l'ordre de 2 à 3°C.

Placer un matériau conducteur sous les cellules, ou à l'intérieur du nid d'abeilles est aussi possible. Cependant, le gain en température est très modéré comparativement aux autres caractéristiques du panneau. Mais ces considérations sur la température maximale acceptable sont bien sûr laissées à la discrétion du constructeur, qui déduira lui-même l'importance et le rapport de coût des différents matériaux.

En [Annexe K](#) sont néanmoins reprises quelques influences de ces paramètres.

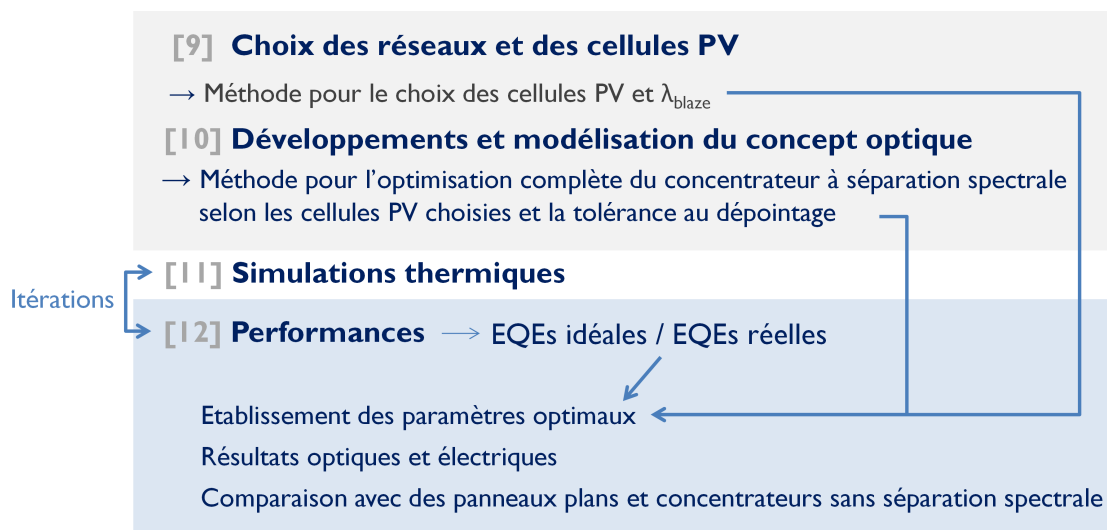
Hypothèses au niveau des cellules PV

Ne connaissant pas toutes les propriétés exactes de nos cellules en termes de réflectivité notamment, et dans un souci de ne pas sous-estimer les résultats, nous avons considéré que les conditions d'entrée au niveau des cellules PV correspondent à $1 - \eta$, η étant l'efficacité de conversion de la cellule. En réalité, ce devrait être $1 - \eta - R$, avec R correspondant à la réflexion au niveau des cellules PV. Notons que dans notre configuration (avec des SJ séparées), un revêtement spécifique à chaque cellule peut être choisi, de sorte à réfléchir un maximum de la lumière qu'elle ne pourrait de toute façon pas convertir, et réduisant par là sa température. Ceci est en effet plus difficile avec une MJ dans le sens où presque tout le spectre est alors nécessaire à la cellule entière.

Chapitre 12

Performances des différentes configurations et comparaison

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les raisons de notre choix de design d'un concentrateur solaire à séparation spectrale, ainsi que les développements de celui-ci et les méthodes d'optimisations à suivre de sorte à parvenir aux systèmes les plus performants possibles optiquement. Dans ce chapitre, les paramètres optimaux seront déterminés selon la combinaison de cellules PV et les contraintes sur la tolérance au dépointage choisies. Nous aborderons alors les performances attendues de ce concentrateur, à la fois du point de vue optique et en termes de puissance électrique de sortie.



En premier lieu, les résultats optiques et l'indicateur sur le rendement électrique (définis en première section) seront présentés dans le cas d'une combinaison optimale de cellules PV idéales (EQEs idéales). Par la suite, des résultats théoriques de puissance de sortie électrique seront estimés sur base de combinaisons de cellules PV réalistes, les plus proches possible de l'optimum. Le cas idéal et le réaliste ont fait l'objet d'une optimisation individuelle étant donné que les cellules PV utilisées modifient les paramètres optimaux de design du concentrateur, et donc les performances aussi bien optiques que électriques.

Une comparaison avec un panneau plan et un concentrateur sans séparation spectrale, simulés selon la même méthode que notre concentrateur avec séparation spectrale, conclura le chapitre.

12.1 Définitions

Les performances de notre concentrateur sont quantifiées via deux grandeurs principales : l'efficacité optique (relatant l'efficacité de séparation spectrale), et la puissance de sortie électrique attendue. Cette dernière valeur est soumise à de nombreuses hypothèses sur les cellules PV utilisées. Ainsi, une autre valeur a été définie, ne nécessitant pas ces hypothèses : c'est un indicateur sur le rendement électrique, défini ci-dessous.

12.1.1 Efficacité optique

Il n'y a pas de convention quant à la définition de l'efficacité optique d'un système avec séparation spectrale. Nous avons dès lors introduit notre propre définition.

Soit $S_{\text{VIS}} = [\lambda_1^{\text{VIS}}; \lambda_{\text{end}}^{\text{VIS}}]$ le spectre à collecter sur la cellule VIS, et $S_{\text{IR}} = [\lambda_1^{\text{IR}}; \lambda_{\text{end}}^{\text{IR}}]$ le spectre à collecter sur la cellule IR. Les efficacités optiques sont alors définies par les équations (12.1), (12.2) et (12.3). $\eta_{\text{opt}}^{\text{VIS}}$ et $\eta_{\text{opt}}^{\text{IR}}$ sont respectivement les fractions de la lumière incidente appartenant à $S_{\text{VIS/IR}}$, atteignant la cellule VIS/IR. η_{opt} est l'efficacité optique globale du concentrateur.

$$\eta_{\text{opt}}^{\text{VIS}} = \frac{\left| \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{\lambda_1^{\text{VIS}}}^{\lambda_{\text{end}}^{\text{VIS}}} \eta_{\text{diff}}^m \cdot \eta_{\text{lens}}^{\text{opt } m} \cdot \text{AM0 } d\lambda \right|_{x_{\text{begin}}^{\text{VIS}}}^{x_{\text{end}}^{\text{VIS}}}}{\int_{\lambda_1^{\text{VIS}}}^{\lambda_{\text{end}}^{\text{VIS}}} \text{AM0 } d\lambda} \quad (12.1)$$

$$\eta_{\text{opt}}^{\text{IR}} = \frac{\left| \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{\lambda_1^{\text{IR}}}^{\lambda_{\text{end}}^{\text{IR}}} \eta_{\text{diff}}^m \cdot \eta_{\text{lens}}^{\text{opt } m} \cdot \text{AM0 } d\lambda \right|_{x_{\text{begin}}^{\text{IR}}}^{x_{\text{end}}^{\text{IR}}}}{\int_{\lambda_1^{\text{IR}}}^{\lambda_{\text{end}}^{\text{IR}}} \text{AM0 } d\lambda} \quad (12.2)$$

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{\eta_{\text{opt}}^{\text{VIS}} \cdot \int_{\lambda_1^{\text{VIS}}}^{\lambda_{\text{end}}^{\text{VIS}}} \text{AM0 } d\lambda + \eta_{\text{opt}}^{\text{IR}} \cdot \int_{\lambda_1^{\text{IR}}}^{\lambda_{\text{end}}^{\text{IR}}} \text{AM0 } d\lambda}{\int_{\lambda_1^{\text{VIS}}}^{\lambda_{\text{end}}^{\text{IR}}} \text{AM0 } d\lambda} \quad (12.3)$$

où η_{diff}^m est l'efficacité de diffraction et $\eta_{\text{lens}}^{\text{opt } m}$ est l'efficacité de transmission de la lentille, pour la lumière diffractée à l'ordre m . $x_{\text{begin/end}}^{\text{VIS/IR}}$ sont les limites spatiales des cellules VIS/IR dans le plan focal. Remarquons que S_{VIS} et S_{IR} peuvent être superposés, η_{opt} n'est donc pas simplement la somme de $\eta_{\text{opt}}^{\text{VIS}}$ et $\eta_{\text{opt}}^{\text{IR}}$.

12.1.2 Indicateur sur le rendement électrique

L'efficacité optique n'est pas capable seule d'estimer le rapport des performances électriques attendues des systèmes optiques. Pour cela, il faut aussi introduire le fait que pour une même efficacité optique, de courtes longueurs d'onde sont mieux converties par une

cellule à large bande interdite en termes de puissance de sortie et donc introduire une dépendance avec E_g . De même, la pondération par le spectre AM0 du soleil doit aussi être prise en compte. Un indicateur sur le rendement électrique a donc été défini, son expression est reprise par l'équation (12.4). F est la fraction de la lumière incidente reçue sur la cellule PV que l'on regarde, dépendant de la longueur d'onde, et $P_{\text{in tot}}$ est la puissance totale incidente au niveau de la lentille.

C'est donc une façon de jauger la puissance de sortie attendue sans la complexité du calcul réel du rendement des cellules PV.

$$\text{Ind}_{\text{rendement}} = \frac{\int \text{EQE}_{\text{idéal}} \cdot F(\lambda) \cdot \text{AM0} \cdot E_g \, d\lambda}{P_{\text{in tot}}} \quad (12.4)$$

12.2 En termes d'EQEs parfaites

Pour comparer les configurations entre elles, en termes de performances optiques, nous les avons optimisées pour les combinaisons de cellules idéales décrites par des EQEs parfaites. Les paramètres choisis sont rappelés dans les points 12.2.1 et 12.2.2. Les résultats optiques pour ces configurations sont repris dans le point 12.2.3. La tolérance au dépointage et la puissance électrique idéale attendue complètent la section.

12.2.1 Combinaisons optimales des cellules et λ_{blaze}

Configuration blazée

Suite à la prise en compte de la configuration symétrique, la combinaison optimale de la longueur d'onde de blaze et des énergies de bande interdite des cellules PV a été légèrement adaptée. La Figure 10.14 reprend une première approximation de la nouvelle combinaison optimale. Comme hypothèse de base, nous prenons donc l'optimum de ce calcul, soit des bandes interdites d'énergies $E_{g,0}/E_{g,1} = 0.9/1.65$ eV et $\lambda_{\text{blaze}} = 540$ nm. Les EQEs idéales couvrent donc respectivement les spectres jusqu'à 751 nm et 1377 nm. Néanmoins, ce résultat doit encore être ajusté lors de la prise en compte de la configuration géométrique exacte. Au final, seule la longueur d'onde de blaze devra être modifiée : l'optimum se situe autour de 520 nm.

Configuration lamellaire

En ce qui concerne la configuration lamellaire, la configuration géométrique ne modifie pas beaucoup la répartition des ordres de diffraction entre les cellules PV. Ainsi, la combinaison optimale obtenue en section 9.2 demeure proche de la meilleure, soit $E_{g,0}/E_{g,1} = 1.15/1.9$ eV avec $\lambda_{\text{optim}} = 480$ nm. Les EQEs idéales couvrent donc respectivement les spectres jusqu'à 652 nm et 1078 nm.

12.2.2 Paramètres géométriques optimaux

Configuration blazée

La configuration blazée symétrique a été décrite dans la section 10.4.4. L'ajout d'une variation de la période a été évoqué en section 10.4.5. Deux configurations ont été retenues : toutes deux symétriques, avec respectivement une période fixe et une période

variable. Elles ont ici été optimisées pour les combinaisons de cellules données au point précédent. La première configuration non-symétrique n'est pas reprise ici car elle n'a pas d'intérêt réel pour notre application étant donné sa très faible tolérance au dépointage et sa faible efficacité.

La configuration avec une période fixe est la plus directe à optimiser : la période de 20 μm étant notre minimum, c'est avec elle que nous aurons la tolérance à l'angle d'incidence la plus grande. Le $F\#$ optimal avait été fixé à 3, la largeur totale de la lentille à 50 mm, et le décentrage tel que la tache focale à l'ordre 1 soit centrée par rapport aux deux éléments optiques symétriques.

L'optimisation avec une période variable donne plusieurs solutions selon la forme de la lentille de base et la distance que l'on impose. Les spectres à focaliser sont ici plus proches et courts que ceux utilisés lors de la description de la méthode au point 10.4.5. Ceci rend difficile de conserver une grande distance entre ordres. La solution optimale trouvée à partir d'une lentille optimisée pour l'ordre 0 améliore le taux de concentration global, mais réduit la tolérance à l'angle d'incidence de 0.05° par rapport à la solution à période fixe (configuration utilisée pour la comparaison). C'est cette configuration qui est reprise dans la Table 12.1. Si l'on veut conserver la même tolérance, soit $\pm 0.7^\circ$, on démarre d'une lentille optimisée pour 20 μm , qui donne un taux de concentration global après optimisation de la période de $6.64\times$.

Configuration lamellaire

La configuration lamellaire a été mise au point et présentée en section 10.5. Contrairement à la configuration blazée, il est possible de presque atteindre les $\pm 1^\circ$ de tolérance avec une période fixe de 20 μm (0.95° exactement), ceci pour un taux de concentration d'environ $4.1\times$. Cependant, de sorte à simplifier la comparaison avec la configuration blazée, la tolérance a été fixée proche de 0.7° , ce qui a pour effet de permettre une période plus grande ($\approx 27\mu\text{m}$) et finalement d'augmenter légèrement le taux de concentration global.

Une seconde configuration avec période variable a été utilisée. Comme précédemment constaté, cette optimisation n'améliore que de peu le taux de concentration ($5.64\times$ au lieu de $5.48\times$).

12.2.3 Résultats optiques

Le résumé des résultats est repris dans les Tables 12.1 et 12.2. Les résultats et les pertes optiques de chaque configuration sont commentés juste après.

Comparaison

On observe une efficacité optique allant jusqu'à 70% dans la gamme d'intérêt pour les deux configurations avec séparation spectrale, mais néanmoins, la configuration lamellaire a l'avantage si l'on regarde l'indicateur sur le rendement ($\text{Ind}_{\text{rendement}}$). Cet avantage est traduit par les résultats de puissances de sortie que nous décrivons en Figure 12.5.

La grande différence entre les deux configurations réside dans le fait que l'ordre 0 et 1(es) ordre(s) (± 1) n'atteignent pas les mêmes cellules PV. Les comportements lors d'un dépointage ou une déformation ne seront donc pas les mêmes (abordés dans le Chapitre 13).

	Période fixe 20 μ m(3 SJ)	Période variable 25-20 μ m(3 SJ)
$E_{g,0}/E_{g,1}$	0.9/1.65 eV	0.9/1.65 eV
$C_{\text{géo}}$	9.03 \times et 17.4 \times (global 5.95 \times)	14.28 \times et 15 \times (global 7.31 \times)
λ_{blaze}	520 nm	520 nm
$\Theta_{90\%}$	0.7°	0.65°
$\eta_{\text{opt IR}}$	52.8%	48.68%
$\eta_{\text{opt VIS}}$	83.9%	84%
$\eta_{\text{opt tot}}$	71.14 %	69.54 %
$\text{Ind}_{\text{rendement}}$	0.7709 (0.1486 et 0.6223)	0.7604 (0.1370 et 0.6234)

TABLE 12.1 – Résultats optiques pour la configuration blazée. L'élément optique a une absorption équivalente à celle d'un film en silicone DC93-500 de 400 μ m d'épaisseur, mais il est optiquement parfait, c.-à-d. qu'il n'a pas d'angle de dépouille, arrondis, déformations, etc. La théorie scalaire est utilisée, et il n'y a pas de revêtement optique particulier.

	Période fixe 27 μ m(3 SJ)	Période variable 25-20 μ m(3 SJ)
$E_{g,1}/E_{g,0}$	1.15/1.8 eV	1.15/1.8 eV
$C_{\text{géo}}$	8.22 \times et 16.39 \times (global 5.48 \times)	8.58 \times et 16.43 \times (global 5.64 \times)
λ_{blaze}	480 nm	480 nm
$\Theta_{90\%}$	0.72°	0.72°
$\eta_{\text{opt IR}}$	66.26%	66.24%
$\eta_{\text{opt VIS}}$	72.6%	72.4%
$\eta_{\text{opt tot}}$	69.96%	69.83%
$\text{Ind}_{\text{rendement}}$	0.8338 (0.237 et 0.5968)	0.832 (0.2369 et 0.595)

TABLE 12.2 – Résultats optiques pour la configuration lamellaire. L'élément optique a une absorption équivalente à celle d'un film en silicone DC93-500 de 400 μ m d'épaisseur, mais il est optiquement parfait, c.-à-d. qu'il n'a pas d'angle de dépouille, arrondis, déformations, etc. La théorie scalaire est utilisée, et il n'y a pas de revêtement optique particulier.

La configuration blazée nécessite une configuration géométrique spécifique, entraînant des pertes et contraignant la tolérance au dépointage, qui est dès lors plus faible que celle atteignable par la configuration lamellaire. Par contre, la configuration lamellaire fait intervenir des ordres de diffraction opposés, ce qui rend difficile la focalisation, et ne permet finalement pas d'atteindre des taux de concentration égaux à ceux de la configuration blazée.

Par ailleurs, les puissances de sortie des deux types de cellules sont un peu plus équilibrées pour la configuration lamellaire, ce qui peut être un avantage, l'une pouvant mieux suppléer l'autre en cas de problème.

Ainsi, l'avantage d'une configuration par rapport à l'autre n'est pas immédiat, et dépend à la fois des puissances de sortie souhaitées, de la répartition entre les cellules, des cellules utilisées, des taux de concentrations nécessaires, etc.

Détails des pertes optiques

Les contributions à la diminution de l'efficacité optique sont de différentes natures, notamment décrites en Figure 12.1 pour les configurations blazée et lamellaire symétriques.

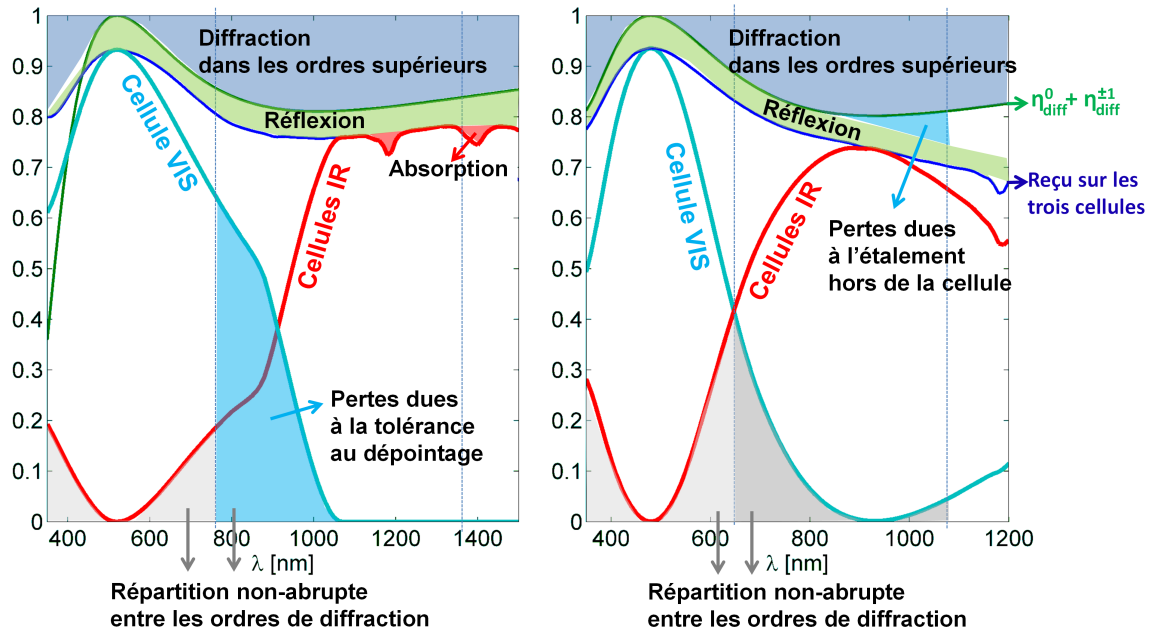


FIGURE 12.1 – Illustration des pertes optiques de notre concept de concentrateur, pour (a) la configuration blazée symétrique et (b) la configuration lamellaire. Les lignes verticales indiquent les zones spectrales d'intérêt pour les cellules VIS et IR. Les courbes en vert foncé et en bleu foncé décrivent respectivement $\eta_{\text{diff}}^0 + \eta_{\text{diff}}^{(\pm)1}$, et la somme de la puissance reçue sur les cellules VIS et IR.

En premier lieu, il y a les pertes identiques pour tout système de concentrateur :

- les pertes par réflexion,
- les pertes par absorption dans la lentille,
- les pertes dues à l'ombrage des dents de la lentille et du réseau (même si le profil est parfait).

Dans notre cas, sans revêtement anti-UV ou autre, nous observons de 5 à 6% de lumière réfléchie, et environ 0.25%/0.55% de lumière absorbée par la lentille respectivement pour la partie visible/IR. A ceci s'ajoutent les pertes dues à l'ombrage, qui sont cependant presque négligeables ici puisque le profil est considéré comme idéal.

Le maximum possible est donc déjà diminué de près de 5 à 7%. Les autres pertes correspondent alors aux pertes intrinsèques aux réseaux de diffraction :

- la lumière diffractée dans les ordres supérieurs,
- les transitions spectrales relativement douces dues aux propriétés de diffraction des réseaux.

Au niveau de la configuration blazée, malgré la collection partielle de l'ordre 2 et l'astuce de la configuration symétrique permettant de collecter les grandes longueurs d'onde diffractées à l'ordre 1 sur la cellule IR voisine, la séparation spectrale finale n'est pas idéale. Additionnée aux pertes dans les ordres supérieurs, elle est la cause du reste des pertes op-

tiques, c.-à-d. près de 40% pour le spectre IR, et 10% pour le spectre VIS.

En ce qui concerne la configuration lamellaire, les résultats sont à peine meilleurs. S'ajoutent les pertes dues à l'étalement de l'ordre -1, qui par choix, déborde légèrement de la cellule. On observe alors 21% de pertes dans le visible et 28% dans l'IR, à cause des caractéristiques de séparation spectrale du réseau lamellaire.

La zone en bleu clair dans le graphique en Figure 12.1(a) met en évidence les pertes optiques propres à la configuration blazée, à savoir les longueurs d'onde perdues dans la zone « tampon » nécessaire à la tolérance au dépointage. Ainsi, près de 3% d'efficacité peuvent être gagnés si la distance entre les taches focales est supprimée. Le graphique en Figure 12.2 montre un exemple d'évolution de la puissance selon cette distance justement, distance elle-même liée à la tolérance à l'angle d'incidence. Notons qu'ici, seule la position de la limite entre les cellules a été modifiée, mais si l'on modifie l'ensemble, on peut en plus gagner sur le taux de concentration puisqu'une tolérance plus faible à l'angle d'incidence permet l'utilisation de périodes plus grandes et donc des cellules plus petites. Dans le cas lamellaire, c'est uniquement l'efficacité de diffraction qui cause les pertes, notamment au niveau des courtes longueurs d'onde diffractées aux premiers ordres qui idéalement devraient être collectées par la cellule VIS au lieu de la cellule IR. Notre concept de concentrateur avec les réseaux de diffraction proposés ne peut donc être rendu plus efficace que dans l'hypothèse de l'application d'un revêtement anti-UV/anti-reflets, ou pour une épaisseur de silicone plus fine. Le gain peut s'élever jusqu'à 6% au niveau de l'efficacité optique.

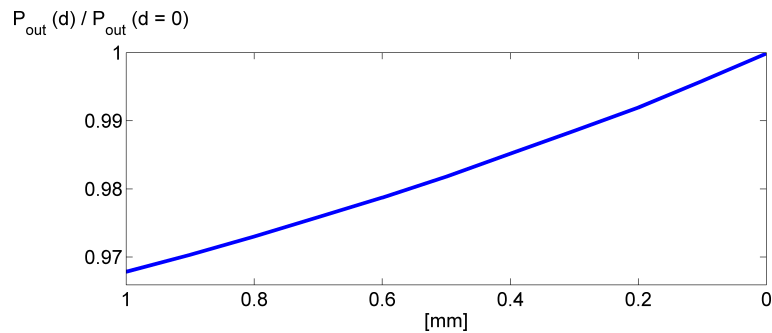


FIGURE 12.2 – Evolution de la puissance de sortie de la configuration blazée selon la marge prise sur la cellule centrale pour absorber une erreur de pointage. Pour les données de la Table 12.1, la distance s'élève à environ 1 mm, permettant une tolérance d'environ 0.7° . En réduisant cette distance à 0, près de 3% de rendement supplémentaires pourraient être extraits des cellules PV.

Remarque

Notons que l'effet de la température et du taux de concentration n'est pas pris en compte dans l'indicateur sur le rendement électrique (12.1.2). Or ces deux points pourraient favoriser le concentrateur avec séparation spectrale. Ils seront par contre pris en compte pour les calculs de puissance de sortie électrique effectués avec des EQEs plausibles, dans la section suivante.

12.2.4 Tolérances à l'angle d'incidence

En Figure 12.3, on peut visualiser l'évolution de l'indicateur sur le rendement selon l'angle d'incidence, pour les deux configurations symétriques avec séparation spectrale, et un concentrateur réfractif simple focalisant sur une SJ avec une bande interdite de 1,42 eV. Ce graphique montre principalement que dans les deux cas, les performances restent stables pour des incidences inférieures à 0.5° , après quoi on commence seulement à voir les pertes. La tolérance dépend presque exclusivement de la distance imposée entre les taches focales. Ceci est tout à fait en accord avec les Figures 10.10(a) et 10.15, où un décentrage de 25 mm et une période de 20 μm correspondaient à la condition pour ne pas avoir de pertes à 0.5° d'incidence.

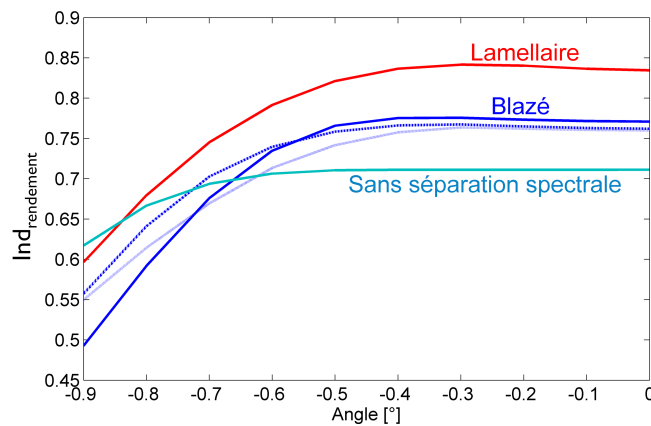


FIGURE 12.3 – Evolution du l'indicateur sur le rendement électrique selon l'angle d'incidence (évolution fort proche de celle des puissances électriques de sortie), pour les configurations symétriques lamellaire et blazée, ainsi que pour un concentrateur réfractif simple focalisant sur une SJ avec une bande interdite de 1,42 eV. Les courbes en bleu foncé regroupent différentes configurations de la version blazée : avec période fixe, et deux types de période variable. Leurs courbes sont très proches étant donné que la distance entre taches focales est imposée à approximativement la même valeur.

Nous n'avons pas abordé la question de la tolérance au dépointage dans la direction cylindrique, étant donné qu'elle est beaucoup moins contraignante que selon l'axe x. Cependant, selon les orbites, le dépointage peut être élevé, avec par exemple environ $\pm 23.5^\circ$ dans le cas des variations saisonnières rencontrées par les satellites en orbite géostationnaire. Ainsi, selon l'erreur de dépointage dans la direction cylindrique, les performances globales seront aussi impactées. Il y a deux effets principaux :

1. La création d'une zone de cellules inutiles et la perte de lumière en bout de ligne, comme l'illustre la Figure 12.4. Cette perte est donc simplement proportionnelle au rapport entre la dimension du panneau et la zone perdue définie par l'angle de dépointage. Cette considération doit faire partie du dimensionnement du panneau.
2. Si l'angle de dépointage devient important, cela va aussi modifier la distance focale, et potentiellement modifier la cartographie du plan focal : si la nouvelle distance mesurée parallèlement à l'angle de dépointage est supérieure à la tolérance, des pertes supplémentaires à celles du point 1 seront à considérer, ainsi que la possibilité de disparition de la séparation spectrale. Ce point sera traité dans le chapitre sur le

Tolérancement, au point 13.1.3.

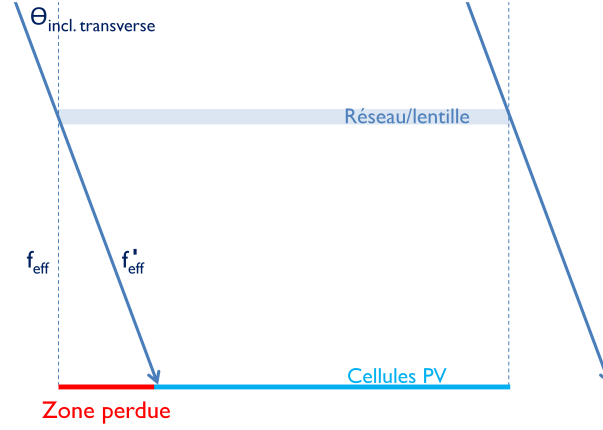


FIGURE 12.4 – Illustration de la zone perdue due à un dépointage de $\theta_{\text{incl.transverse}}^\circ$ selon l'axe linéaire du concentrateur.

12.2.5 Résultats en termes de puissance électrique

Outre les résultats optiques, les puissances électriques de sortie, même avec l'hypothèse d'EQE idéales, sont une donnée intéressante, permettant de visualiser l'avantage ou non du concentrateur. Selon les hypothèses, on obtient les valeurs du graphique 12.5.

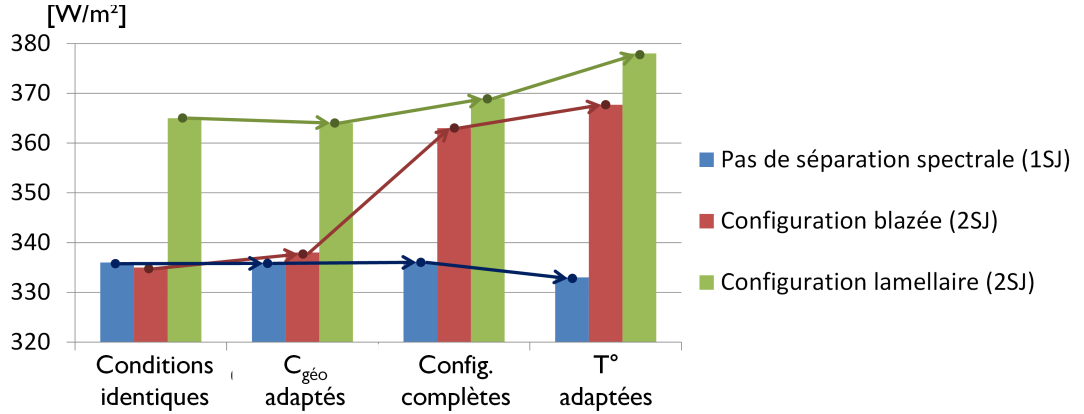


FIGURE 12.5 – Effets du taux de concentration, de la configuration géométrique et de la température sur les puissances de sortie idéales $[\text{W}/\text{m}^2]$, calculées avec la théorie scalaire de la diffraction et des EQEs idéales. **Etape 1** : conditions identiques pour chaque configuration, c.-à-d. 70°C et $C_{\text{géo}} \approx 11\times$ pour chaque cellule. **Etape 2** : adaptation du taux de concentration. **Etape 3** : introduction de la configuration symétrique et des pertes optiques (ajout des modèles géométriques). **Etape 4** : adaptation des températures (respectivement $79, 63$ et 55°C pour le concentrateur sans séparation spectrale, la configuration blazée et la configuration lamellaire).

Ce graphique retrace les évolutions des hypothèses, et leurs effets sur la puissance théorique de sortie. La première étape correspond aux résultats de la section 9.3 (pas de configuration géométrique, juste les efficacités de diffraction). La seconde étape intègre les taux de concentration, la troisième prend en compte la configuration symétrique et la

dernière étape adapte les températures de fonctionnement.

La principale information remarquable est la large augmentation des performances grâce à la configuration symétrique dans le cas blazé : ce n'est qu'avec cette configuration que le système blazé devient intéressant en comparaison avec un concentrateur classique focalisant sur une mono-jonction. La configuration lamellaire conserve un léger avantage en puissance de sortie maximale, mais est en arrière pour les taux de concentration.

12.3 Avec des EQEs réalistes

Pour avoir une idée de la puissance de sortie attendue, nous avons aussi réalisé des simulations théoriques, mais sur bases d'EQEs réelles. Ainsi, pour chaque configuration, nous avons en premier lieu tenté de trouver des cellules existantes et suffisamment documentées, qui de surcroît sont proches des combinaisons de cellules optimales. Les résultats sont donc fort dépendants du choix et des caractéristiques de ces cellules. Il est d'ailleurs certainement possible de trouver des combinaisons plus optimales que celles utilisées ici comme exemple. Les résultats sont donnés en Table 12.3 : les performances sont légèrement à l'avantage de la configuration lamellaire. Cependant, celle-ci possède un taux de concentration inférieur, et une combinaison de cellules PV plus proche de son optimum que la configuration blazée, ce qui peut justifier la différence.

	Configuration blazée (3SJ)	Configuration lamellaire (3SJ)
E_g [eV]	1 GaAs (1.4) & 2 InGaAs (0.7)	2 Si (1.11) & 1 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ (1.83)
$C_{\text{géo}}$ [×]	12 et 16 (global 6.85)	8.3 et 16.3 (global 5.49)
Température [°C]	70	65
P_{outmax} [W/m ²]	287 (2×16.7+253.5)	299 (2×58+183)
λ_{blaze} [nm]	650	450
$\Theta_{90\%}$ [°]	0.7	0.7

TABLE 12.3 – Résultats sur base de cellules réelles et EQEs expérimentales [66, 18, 64] (voir Figure 5.5). L'angle de dépouille est nul, mais l'absorption d'un film de 400 μm d'épaisseur est prise en compte. Les efficacités de diffraction sont calculées via le programme PC-Grate[®].

Ces résultats sont donnés pour des éléments optiques idéaux, c.-à-d. sans angle de dépouille, arrondis, etc. Il n'y a pas non plus de revêtement anti-UV ou anti-reflet. L'effet d'un tel revêtement sera abordé en section 15.2.4.

12.4 Comparaison avec un panneau simple, et avec un concentrateur simple

Les valeurs de puissance et performances obtenues pour notre concentrateur sont théoriques, et basées sur certaines approximations et hypothèses. Elles ne sont donc pas exactes dans l'absolu et ne peuvent être directement comparées à des résultats dans la littérature. Pour avoir une échelle de comparaison, nous avons alors simulé un panneau plan et un concentrateur classique focalisant sur des cellules SJ, DJ et TJ. Les simulations étant réalisées selon les mêmes méthodes, les résultats peuvent être comparés avec plus de confiance. Notons que comparer les résultats avec des EQEs idéales est moins représentatif avec des MJ dans le sens où ces MJ perdent l'avantage de la surestimation dans les faibles longueurs

d'onde et que la combinaison des bandes interdites est extrêmement sensible. Nous effectuons donc les comparaisons avec des EQEs plausibles, basées sur des cellules MJ réelles. Les cellules utilisées pour ces simulations sont celles détaillées en section 5.4 : une mono-jonction GaAs, une double-jonctions InGaP/GaAs, et une triple-jonctions InGaP/GaAs/Ge. Pour chaque résultat, des simulations thermiques ont été réalisées, exactement de la même façon que pour les configurations des concentrateurs avec séparation spectrale.

12.4.1 Panneau plan

Dans le cas d'un panneau plan, la tolérance à l'angle d'incidence est très large, la température globale est relativement basse, et l'efficacité optique est de 100% (pas de pertes optiques dues à un élément optique supplémentaire). Mais bien entendu, le taux de concentration est de $1\times$. Les performances devraient donc être supérieures à celles d'un panneau avec concentrateur, mais le désavantage de la masse et du coût est grand. Les résultats de nos simulations sont repris en Table 12.4.

	SJ	DJ	TJ
Cellules	GaAs	InGaP/GaAs	InGaP/GaAs/Ge
Température	54 °C	51°C	48°C
P_{out}	295 W/m ²	335 W/m ²	370 W/m ²

TABLE 12.4 – Résultats pour un panneau plan couvert respectivement de SJ, DJ ou TJ.

12.4.2 Concentrateur sans séparation spectrale

On peut aussi comparer avec un concentrateur classique composé d'une lentille de Fresnel focalisant sur une SJ, DJ ou une TJ. Dans ce cas, notre concentrateur n'a d'avantage que sa puissance de sortie, et comme on l'a déjà mentionné et on le verra ici encore, a priori uniquement en fin de vie. Cependant, pour être digne d'intérêt, il faut au minimum que les performances de notre concentrateur avec séparation spectrale utilisant deux SJ soient meilleures que celles d'un concentrateur plus simple focalisant sur une seule SJ... Au regard des résultats de la Table 12.5, c'est en effet le cas. Par contre, nos performances en début de vie sont inférieures à celles du concentrateur simple focalisant sur des DJ ou TJ. Bien que ce soit un résultat attendu, ceci illustre bien l'importance des pertes optiques et la non-idéalité de séparation spectrale inhérentes à notre concentrateur.

	1SJ	1DJ	1TJ
Cellules	GaAs	InGaP/GaAs	InGaP/GaAs/Ge
η_{opt}	94%	93.5%	93.5%
$\theta_{90\%}$	0.82°	0.82°	0.82°
Température	84°C	80°C	76°C
P_{out}	282 W/m ²	317 W/m ²	354 W/m ²

TABLE 12.5 – Résultats pour un concentrateur sans séparation spectrale. $C_{géo} = 11\times$.

12.4.3 Dépendance avec la température

En Figure 12.6, sont repris les mêmes résultats que dans les tables précédentes, mais en fonction de la température de fonctionnement des cellules PV. On observe bien le

placement de notre concept entre les résultats d'une SJ et d'une DJ sous concentrateur, ainsi que sa température modérée par rapport à un concentrateur classique. Ce graphique met en évidence le comportement selon la température : la dépendance est sensiblement la même pour toutes les configurations, mais l'écart de température entre les configurations permet de réduire un peu la différence en puissance de sortie. Les cercles représentent les températures approximatives calculées avec notre modèle ESATAN. Avec un autre panneau de base, ces résultats peuvent se déplacer globalement, et les uns par rapport aux autres.

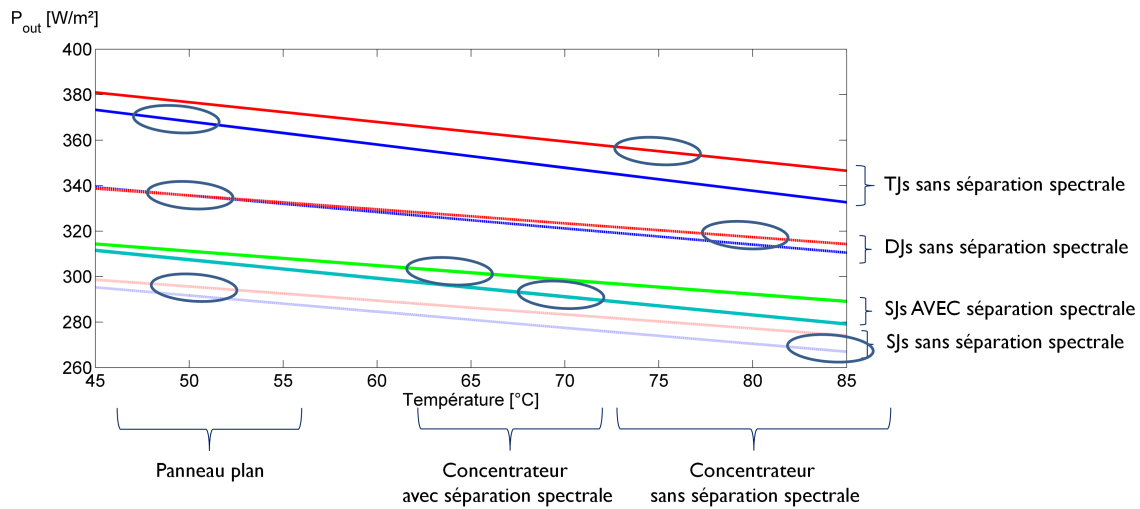


FIGURE 12.6 – Evolution des puissances de sortie selon la température de fonctionnement des cellules PV.

12.4.4 Conclusions

Une comparaison directe des configurations et solutions possibles est complexe puisqu'elle fait intervenir un grand nombre de paramètres tels le gain de coût et de masse grâce au taux de concentration, la puissance de sortie par unité de surface, par unité de masse et le rapport avec le coût global. Les températures sont aussi à considérer lors des processus de fabrication, ainsi que les modes de déploiement, la fiabilité, le vieillissement et les performances en fin de vie, etc. D'après nos résultats ici présentés, nous pouvons simplement tirer les conclusions suivantes, sans pour autant leur donner un aspect définitif puisque dépendant de beaucoup de variables externes :

- Le taux de concentration permet un gain certain par rapport à un panneau plan au niveau du coût et de la masse. Le taux de concentration effectif s'exprime comme $C_{\text{géo}} \cdot P_{\text{out conc.}} / P_{\text{out plan.}}$. Nous avons donc une surface de cellules PV respectivement $4.43 \times$ (config. lamellaire) et $5.3 \times$ (config. blazée) plus petite que celle d'un panneau plan couvert de cellules MJ, pour une même puissance de sortie. Sans compter que les configurations avec séparation spectrale ne sont pas dans leur configuration optimale au niveau de la combinaison de cellules PV, et que les cellules SJ sont moins coûteuses que les MJ.
- En termes de puissance électrique pour le cas étudié, nos résultats sont meilleurs que ceux d'un concentrateur sans séparation spectrale focalisant sur une mono-jonction,

et juste dessous ceux avec une DJ. Ce résultat est assez bon étant donné que l'efficacité optique de notre concentrateur est par contre clairement inférieure aux autres systèmes.

- Les températures estimées sont inférieures à celles d'un concentrateur sans séparation spectrale, ce qui est un avantage pour la fabrication et la durée de vie du panneau.

L'avantage de la concentration solaire est donc évident, celui de la séparation spectrale est plus discret. En effet, bien que notre concept permette de surpasser un concentrateur simple focalisant sur une SJ, ses performances BOL sont inférieures à celles du même concentrateur focalisant sur une MJ. Ainsi, le potentiel du concept de la séparation spectrale ne se révélera qu'aux conditions suivantes :

- Si des cellules mieux adaptées et plus proches des combinaisons optimales sont mises au point, les performances seront accrues, surpassant peut-être les systèmes à DJ. L'usage de revêtements spécifiques aux cellules PV, non-compatibles avec des MJ, sont aussi une piste pour améliorer les résultats.
- La séparation spectrale permet un vieillissement plus lent grâce à l'indépendance électrique des SJ, mais aussi pourquoi pas par la liberté d'usage de cellules plus résistantes aux radiations, a priori non compatibles avec le concept de MJ. Les performances EOL devraient donc être supérieures aux autres systèmes.
- Un gain de masse et/ou de coût est favorisé par le choix approximativement libre des cellules PV qui caractérise notre concentrateur.

Il est difficile d'estimer ces avantages, et c'est un point crucial à aborder pour toute suite à cette étude. Nous en reparlerons notamment dans le Chapitre 15.

12.5 Conclusions

Ce chapitre a mis en avant les performances attendues de notre concentrateur.

Les configurations optimales avec des cellules idéales présentent une efficacité optique autour de 70%, des taux de concentration entre 5.5 à $7\times$, une tolérance à $\pm 0.7^\circ$ de dépointage, et surtout des performances supérieures à celles d'un concentrateur sans séparation spectrale, confirmant l'intérêt du concept. Les origines des pertes optiques principales ont aussi été identifiées, et l'importance de la géométrie symétrique pour la configuration blazée a été à nouveau démontrée.

Pour établir une comparaison avec des systèmes utilisant des cellules MJ, il nous a fallu ré-optimiser le concentrateur pour une combinaison avec des cellules réalistes les plus proches possible de l'optimum. Cette combinaison n'est pas optimale, et les résultats obtenus sont donc inférieurs au potentiel du concentrateur. Avec cette configuration, les performances de notre concentrateur demeurent néanmoins supérieures à celles d'un concentrateur focalisant sur une cellule SJ. Les comparaisons avec les systèmes à cellules MJ ne sont par contre pas à notre avantage actuellement. Pour y remédier, le concentrateur nécessiterait d'autres cellules PV plus en adéquation avec les combinaisons optimales ou optimisées spécifiquement pour notre application, ainsi que la prise en compte des dégradations spectrales encourues au cours du temps. Les avantages potentiels de la concentration solaire et de la séparation spectrale seront abordés dans le Chapitre 15.

Chapitre 13

Tolérancement et pertes optiques

Bien que la cohérence du concept optique du concentrateur ait été démontrée (possibilité de séparation spectrale et spatiale), ce concentrateur ne serait pas utile et réalisable s'il s'avère trop sensible aux erreurs de fabrication ou aux déformations. Travailler avec des lentilles de Fresnel et des réseaux de diffraction peut en effet induire un système très sensible aux déformations, puisque notamment l'efficacité du réseau régit presque linéairement l'efficacité globale du concentrateur, et fait partie des éléments dont la réplique doit être minutieuse. Le concept réfractif global nous assure néanmoins une structure plus tolérante qu'une approche en réflexion [109, 110, 111].

C'est ainsi qu'à l'instar de tout système optique, une étude des pertes optiques et un tolérancement sont nécessaires.

Dans ce chapitre, nous détaillerons en premier lieu les origines possibles de dégradation des performances associées au système optique. Pour chaque situation, une étude a été réalisée, détaillée en [Annexe L](#). Le résumé des effets de chacun des aspects étudiés est repris à la fin du chapitre, ainsi que la conclusion sur les éléments nous paraissant les plus importants.

13.1 Sources de dégradations optiques

Les sources principales de pertes optiques pour notre système sont les suivantes :

1. des erreurs de fabrication au niveau des profils des structures dentelées (lentille et réseau),
2. des déformations de l'élément optique (rétreint, élongation, courbure),
3. des erreurs d'assemblage entre le réseau et la lentille, ou entre l'élément optique et les cellules PV,
4. une variation de l'indice de réfraction (due à une variation de température, à l'effet des radiations, à une approximation de mesure, ...),
5. une approximation sur les E_g des cellules et la longueur d'onde de blaze correspondante.

Chacune est décrite succinctement ci-dessous, ainsi que leur influence présumée sur les performances (principalement les puissances de sortie électriques à incidence nulle et à 0.8° d'incidence).

D'autres erreurs impacteront les performances du concentrateur, comme notamment les incertitudes sur l'environnement durant la mission (température, dose de radiations, contraintes mécaniques effectivement rencontrées), ainsi que le rendement réel des cellules PV et leur comportement vis-à-vis de cet environnement spatial. Ces considérations doivent être prises en compte lors d'un budget d'erreur global du concentrateur. Dans notre étude, nous nous limiterons aux effets agissant directement sur l'efficacité optique du concentrateur, listés ci-dessus. Ils seront alors à remettre dans le contexte de la mission spatiale considérée et de ses contraintes particulières.

13.1.1 Erreurs de fabrication

Le processus de fabrication évoqué en section 4.1.1 implique la réalisation d'un moule par *diamond turning*, une répllication en silicone (par injection ou impression), et une étape de démoulage. Le silicone est reconnu pour sa grande qualité de répllication. C'est donc souvent au niveau du moule que les erreurs de fabrication apparaissent déjà, reproduites ensuite dans l'élément optique final.

A priori, les répliques de qualité possèdent moins de 2 à 3% de pertes par rapport à la forme idéale, même au niveau des réseaux de diffraction (d'autant mieux répliqués que la période est grande, ce qui est à l'avantage de notre système) [112, 113].

Les erreurs principales sont de deux types : un angle de dépouille et un arrondi, détaillées dans les points suivants et en Annexe L.1. La question de la rugosité intervient aussi, surtout pour des optiques qui ne peuvent pas être polies après fabrication. Cependant, pour 2 à 3 nm de rugosité (les meilleures performances actuelles), les pertes de diffusion intégrées totales (« total integrated scattering - TIS- ») s'élèvent à moins de 0.2% et 0.05% respectivement pour les intervalles spectraux [400-900] nm et [900-1600] nm [114]. Ces valeurs sont bien inférieures aux pertes dues aux arrondis et angles de dépouille, comme nous le verrons ci-dessous.

Par ailleurs, nous pouvons aussi rencontrer des erreurs au niveau de la période du réseau de diffraction, ou un alignement approximatif du réseau sur la lentille, ... aussi abordés dans les points suivants et en Annexe L.2. Le réseau en tant que tel nécessite une caractérisation précise à la fois pour sa période et pour son efficacité de diffraction, puisqu'il est un acteur primordial de l'efficacité de séparation spectrale du concentrateur.

Notons finalement que le processus de fabrication nécessite couramment une fonction numérique pour décrire la forme de chaque structure à graver. Dans le cas de la lentille de Fresnel, l'approximation de sa forme par un polynôme de degré 5 au niveau de chaque dent est nécessaire pour conserver les résultats optimaux de simulation.

Angle de dépouille et arrondi

Les méthodes de répllication par injection nécessitent un léger angle de dépouille dans le moule de sorte à pouvoir sortir la réplique lors du démoulage. De plus, l'outil utilisé pour réaliser ce moule est rarement parfaitement « vertical », ce qui fait qu'il y a toujours un certain angle de dépouille pour les structures à dents. En plus de cette inclinaison, le processus de réalisation de structures en relief par *diamond turning* induit des arrondis à la fois aux maxima et minima du relief. Ceci est presque exclusivement dû au rayon de courbure de l'outil utilisé pour la gravure, et se retrouve donc à la fois dans la structure du réseau de diffraction et dans celle de la lentille de Fresnel. Cet arrondi peut par ailleurs être amplifié par un remplissage imparfait du moule lors du processus d'injection.

L'impact de ces deux dégradations de profil est différent selon qu'il s'agit de structures réfractives ou diffractives.

Le principe de ces dégradations est illustré en Figure 13.1 pour une lentille de Fresnel : l'angle de dépouille et l'arrondi créent une zone d'où les rayons sont réfractés dans des directions autres que celles souhaitées. Cette zone devient optiquement « morte ».

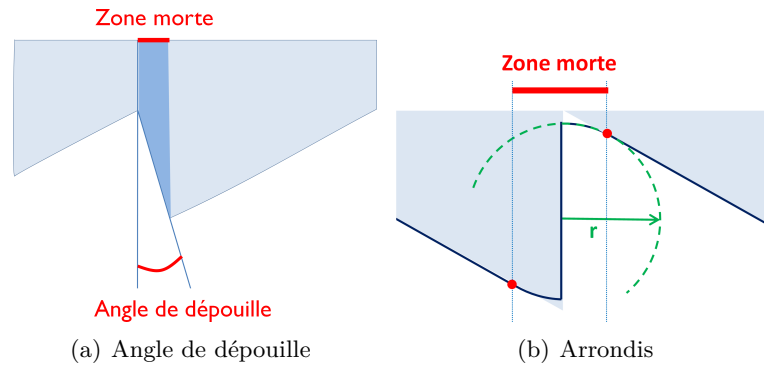


FIGURE 13.1 – (a) Schéma de l'angle de dépouille et (b) schéma de l'arrondi au bout d'une dent de lentille de Fresnel. La zone morte correspond aux rayons qui, après avoir traversé la lentille, atteindront la zone penchée ou arrondie de la dent créée par les imperfections de l'outil de fabrication, et qui n'atteindront donc pas le bon endroit dans le plan focal.

Pour un réseau de diffraction, l'angle de dépouille s'élève généralement à moins de 1° [110], ce qui modifie dans notre cas les efficacités de diffraction de moins de 0.3%. Quant à l'arrondi, il modifie à la fois la forme du réseau et sa hauteur [110, 115, 116], altérant donc la courbe d'efficacité de diffraction. Cette erreur est d'autant plus faible que la période est grande (ce qui est favorable pour notre concept basé sur des réseaux à grandes périodes), et que le rayon de l'outil est petit. 1% de modification apparaît pour un rayon de $45\ \mu\text{m}$ (ce qui ne signifie pas une diminution des performances d'1%, puisque la lumière se répartit différemment entre les ordres). Les références [115, 116] utilisent des rayons d'outils de 2.5 et $7.7\ \mu\text{m}$, générant des modifications d'efficacité de diffraction inférieures à 1/10 000.

Dans le cas d'une lentille de Fresnel réfractive, l'angle de dépouille s'élève à près de 2° . La zone d'ombrage ainsi créée cause généralement près de 1% de pertes optiques. Dans nos simulations, l'arrondi est intégré via un angle de dépouille équivalent, défini à partir de la largeur perdue liée à l'arrondi. Ce calcul est repris en Annexe L.1. La lentille de Fresnel est plus sensible à un arrondi que le réseau de diffraction. En général, le rayon de l'outil de gravure est inférieur à $30\ \mu\text{m}$ [110], et selon le nombre de dents, cela donne lieu à un maximum de 1.7% de zones d'ombrage.

Erreurs sur le réseau

Une erreur au niveau de la période du réseau modifie les angles de diffraction. Bien sûr, l'effet d'une modification de la période de diffraction ne joue pas sur l'ordre 0, mais uniquement sur les ordres de diffraction supérieurs. Nous avons ici considéré une erreur

d'échelle au niveau du réseau, soit sa multiplication/division par un facteur d'erreur. Une erreur aléatoire pour chaque structure pourrait aussi intervenir dans la simulation, donnant un résultat intermédiaire entre les facteurs de multiplication maximaux et minimaux. Les précisions de fabrication actuelles sont très élevées, et a priori, une erreur de moins de 0.5% sur la période annoncée peut être espérée, comme dans le cadre du projet Guide2Dye (G2D) décrit au point 17.1. Ceci n'a alors pas de réel impact sur les performances. Néanmoins, si l'erreur n'est pas négligeable et qu'elle est connue, la lentille peut être ré-optimisée en fonction, de sorte à maximiser les performances. Pour les configurations avec variation de période, il est assez aisé de savoir dans quelles marges il faut se trouver pour rester approximativement dans les mêmes conditions de performances, sans pour autant modifier la forme de la lentille : dans la zone centrale entre les périodes limites (voir section 10.4.5). Les dimensions et positions des cellules PV doivent alors être adaptées en conséquence.

Le problème d'alignement du réseau sur la lentille n'est véritablement important que dans le cas d'une période variable le long de la lentille, et dans le cas où l'option de combiner directement le réseau avec le profil de lentille de Fresnel n'est pas choisie (voir [Annexe F](#)). Dans les situations où cette erreur peut apparaître, l'amplitude des variations induites dans les performances de sortie n'est pas très élevée, et les pertes dues au bord non-couvert par le réseau sont bien supérieures à celles dues au décalage en tant que tel.

13.1.2 Déformations

Il existe de très nombreuses sources de déformation. Dans notre cas, nous pouvons penser aux erreurs de fabrication en partie évoquées au point précédent, mais aussi à une variation de température, ou à une contrainte imposée par le système de maintien de l'élément optique. Différents effets sont abordés ci-dessous, et détaillés en [Annexe L.3](#).

Différence de température de fonctionnement La différence de température entre le silicone injecté à chaud, et le silicone refroidi après démoulage peut causer un léger rétreint, modifiant la forme des structures notamment de la lentille. Le silicone est cependant connu pour sa qualité de réplcation, et les processus de réplcation sont optimisés pour prendre en compte cet effet de température [117].

La différence de température de fonctionnement sur le satellite avec celle de design peut aussi causer ce rétreint, et modifier les profils structurés. Le coefficient de dilatation thermique linéaire du silicone se situe autour de $\alpha_{\text{silicone}} = 3.2 \times 10^{-4} [\text{C}^\circ\text{C}^{-1}]$. Ainsi, on peut calculer en première approximation le rétreint linéaire sur la hauteur, pour un système de largeur fixe, selon l'expression :

$$L' = L \cdot (1 + \alpha_{\text{silicone}} \cdot \Delta T)$$

Dans ce cas, un ΔT supérieur à 30°C cause un facteur de déformation de 1%, à l'origine de moins d'1% de dégradation des performances.

Une modification de profil peut finalement provenir d'une différence de température le long de la dent de la lentille par exemple. Cependant, la température entre les extrémités ne peut pas être très différente. Un ΔT de 5°C cause moins de 0.4% de différence avec les performances initiales, même à incidence non-nulle.

Contrainte de tension imposée par la structure de déploiement La structure de déploiement maintient l'élément optique en tension, pour qu'il conserve sa forme.

Dans le cas du projet SLA, basé sur le même type de lentille et de matériau, une élongation jusqu'à 102% est imposée [98]. Cette élongation, si elle n'est pas prise en compte lors du design, va aplatir l'élément optique, modifiant la forme du profil de la lentille, et celle du réseau de diffraction. Les effets à prendre en compte sont donc multiples : à la fois, il y a un facteur d'aplatissement à appliquer à la lentille et au réseau, mais il y a aussi une élongation à appliquer selon l'axe x , qui va étaler les taches focales.

Un rétreint ou une extension se traduisent dans nos simulations par un facteur constant appliqué au profil, modifiant localement la pente du profil de la lentille et la valeur de l'angle de dépouille. Dans notre cas, une déformation de $\pm 1\%$ mène à moins d'1% de pertes dans les performances. 2% de déformation modifie peu la puissance à incidence nulle ($>99\%$), mais peut réduire la tolérance au dépointage. Outre les aspects géométriques, l'aplatissement du réseau va modifier sa longueur d'onde de blaze, et donc impacter directement l'efficacité de séparation spectrale, ce qui sera abordé en section 13.1.5.

Les déformations de rétreint ou d'extension modifient notamment les propriétés de focalisation de l'élément optique. En déplaçant le plan focal comprenant les cellules PV respectivement vers le haut ou le bas, l'effet de ces déformations peut être corrigé. Ainsi, si l'on connaît la déformation due à l'étirement entre les montants de la structure de déploiement ou bien celle attendue à cause des différences de température, il est possible de les corriger presque entièrement en ajustant le plan des cellules PV.

Finalement, une courbure de la lentille peut aussi se rencontrer, dans le cas où la tension dans les montants n'est pas bien estimée, que la distance entre les montants est plus courte que prévue, si le silicone se détend, etc. Cette courbure est qualifiée par la « flèche », définissant la hauteur entre la position initiale et le maximum de courbure (voir Figure 13.2). Cette déformation modifie les angles de réfraction, mais aussi la distance locale avec le plan des cellules PV. Les modifications dans la réfraction sont plus importantes en bord de lentille, c'est-à-dire là où la pente locale est initialement la plus élevée. Etant donné que les bords sont fixés par les montants, leur hauteur ne varie que peu, et modère donc l'impact dans le plan focal. Le centre de la lentille n'a que de faibles angles de sortie, une différence de hauteur n'aura donc pas un très grand effet dans le plan des cellules PV. Dans notre cas, une flèche inférieure à 2.5 mm a même des effets positifs sur la puissance de sortie à incidence nulle et non-nulle. Elle se dégrade cependant pour les valeurs supérieures. Une flèche de 5 mm par exemple (pour un élément optique symétrique de 100 mm de large) dégrade la puissance à incidence non-nulle à 99% de sa valeur initiale.

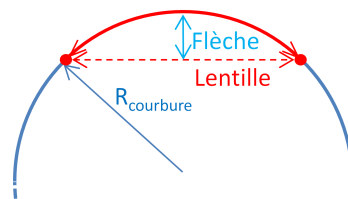


FIGURE 13.2 – Schéma de la courbure de l'élément optique (réseau/lentille) et définition de la flèche.

13.1.3 Erreurs d'assemblage

Outre les déformations, les erreurs d'assemblage sont aussi à considérer, dont certaines sont présentées en Figure 13.3, et détaillées en Annexe L.4. Elles font notamment intervenir :

1. le parallélisme entre la lentille, le réseau et le panneau,
2. la distance focale effective,
3. la précision de placement et des dimensions des cellules PV.

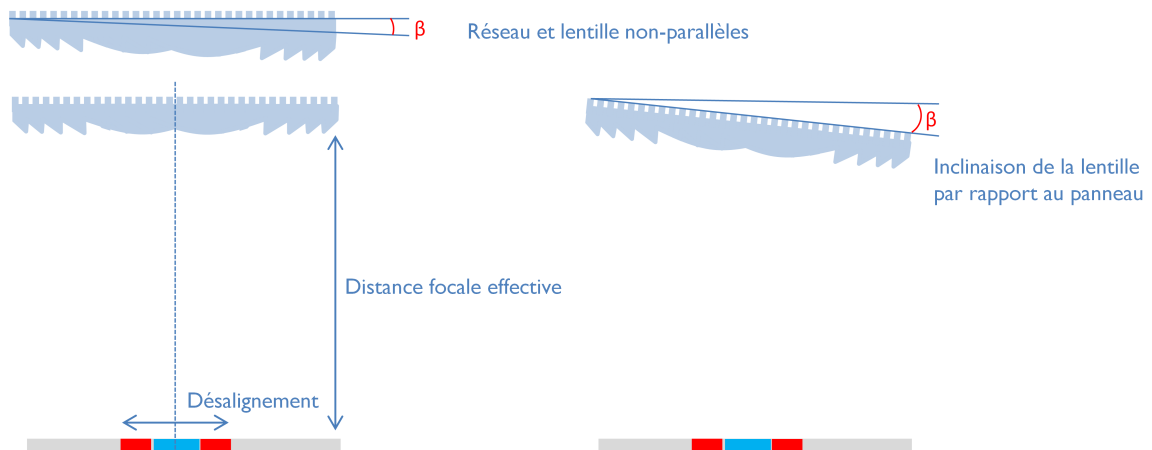


FIGURE 13.3 – Erreurs d'assemblage considérées pour le tolérancement : erreurs de parallélismes entre la lentille et le réseau, ainsi qu'entre l'élément optique et le panneau, erreurs sur la distance focale et le positionnement/dimensions des cellules PV.

Erreurs de parallélisme réseau-lentille Dans le cas d'un réseau imprimé sur la face avant de l'élément optique, la question du parallélisme avec la face arrière (lentille de Fresnel) est à considérer. Si le réseau reste aligné avec le soleil et que la lentille est légèrement inclinée, cela va engendrer un déplacement des taches focales dans le plan focal, ainsi qu'une déformation. Cependant, cette erreur apparaît typiquement lors de la fabrication, elle peut donc être connue. Dès lors, il suffit de décaler les cellules PV dans le plan focal pour correspondre à la lumière focalisée, ce qui permet de retrouver des performances très proches du design initial (99% pour un angle de 1.5°). Pour des angles supérieurs, la non-linéarité du phénomène modifie trop les taches focales, ce qui ne permet plus de garder les mêmes performances simplement en déplaçant les cellules PV.

Notons que les résultats sur G2D ont montré une bonne corrélation avec la théorie malgré le parallélisme approximatif (0.6° d'erreurs) entre la lentille et le réseau. L'effet est pourtant d'autant plus important dans cette configuration que la lentille n'est pas Fresnelisée et est donc plus épaisse.

Que l'inclinaison provienne du réseau ou de la lentille n'apporte que peu de différence pour des angles inférieurs à 1.5° . Pour cet ordre de grandeur d'inclinaison, l'hypothèse d'épaisseur nulle (introduite en section 10.2) demeure acceptable.

Erreurs de parallélisme avec le panneau Le déploiement peut occasionner une légère inclinaison entre le plan de l'élément optique déployé, et celui du panneau comprenant les cellules PV. Si une inclinaison apparaît dans le sens de l'axe cylindrique,

cela revient en chaque point à une variation de la distance lentille-panneau évoluant le long du panneau. Par contre, si l'inclinaison est dans l'axe perpendiculaire, l'effet sur les performances est différent. Le cas général est alors de considérer que le panneau est aligné avec le soleil, tandis que la lentille ne l'est pas tout à fait. Cette situation est assez contraignante car l'angle d'incidence vu par la lentille inclinée ($\theta_{\text{inc}} = -\theta_{\text{inclinaison}}$) ne compense pas l'inclinaison de l'axe de la lentille : les taches focales seront décalées par rapport aux cellules placées dans le plan focal. Sans correction de la position des cellules, une inclinaison de seulement 1° cause 1% de perte à incidence nulle, et près de 10% à 0.8° d'incidence.

Erreurs d'alignement et de dimensions des cellules PV La fabrication du panneau nécessite une phase d'alignement entre l'élément optique et les cellules PV. Une erreur sur le placement de l'un ou de l'autre induit des pertes principalement à cause de la réduction de l'efficacité de séparation spectrale. Cependant, si l'on considère une valeur d'alignement avec une précision meilleure que 0.1 mm, les pertes seront inférieures à 1%.

Cette erreur s'accroît si les dimensions des cellules ne sont pas exactes.

Erreurs de distance entre le panneau et l'élément optique Une erreur de distance entre l'élément optique et le panneau peut provenir d'une erreur de fabrication des montants maintenant la lentille, ou d'une modification de leur longueur due par exemple à un changement de température. Cette distance est importante dans notre cas car elle définit à la fois la dimension des taches focales au niveau des cellules, mais aussi la distance entre elles. Notre concentrateur possède une distance focale d'environ 150 mm. Une variation de moins de 1 mm permet de demeurer au-dessus de 99% des performances initiales. Une variation supérieure réduit la distance entre les taches focales, et même sans modifier la puissance de sortie à incidence nulle (quasiment inchangée pour des erreurs de ± 3 mm), va réduire de façon conséquente la tolérance au dépointage. Au niveau de la fabrication et du déploiement, la contrainte du millimètre devrait être respectée. Si l'on opte pour des montants en aluminium (Al-7075 T651), comme pour une grande part des structures dans le spatial, le coefficient d'expansion thermique α_{Al} s'élève à 25.2×10^{-6} m/(m.K) [118]. La contrainte du millimètre est donc respectée pour une différence de température inférieure à $\Delta L/(\alpha_{\text{Al}}.L_0) = 1/(\alpha_{\text{Al}}.150) > 260^\circ\text{C}$.

Outre les erreurs de fabrication et de température, la distance focale réelle peut différer de celle de design dans le cas d'un dépointage dans l'axe cylindrique de l'élément optique, comme l'illustre la Figure 12.4. La distance entre l'élément optique et la tache focale suivant l'inclinaison transverse s'exprime alors comme suit : $f'_{\text{eff}} = f_{\text{eff}} / \cos(\theta_{\text{incl.transverse}})$. La tolérance du millimètre est donc respectée pour un dépointage inférieur à 6.6° , celle des 3 mm nécessite un dépointage inférieur à 11.5° . L'inclinaison maximale provenant des variations saisonnières pour les satellites en orbite géostationnaire est d'environ 23.5° , ce qui donne lieu à un allongement de la distance focale effective d'environ 13.56 mm et donc à la disparition des deux taches focales spectralement dissociées. Ainsi, bien que la configuration linéaire permette une réduction sur les conditions de pointage, elle nécessite malgré tout une précision d'environ ± 6 à 11° sur l'axe le moins contraignant selon la contrainte sur la tolérance au dépointage.

13.1.4 Modification de l'indice de réfraction

Comme évoqué en section 8.2, l'indice de réfraction est très important pour le design puisqu'il définit notamment la dispersion spatiale et spectrale de la lumière dans le plan focal. Il est en effet à la base du calcul de la forme de la lentille de Fresnel et participe au choix de la hauteur des dents du réseau, qui définit la longueur d'onde de blaze et donc l'efficacité de diffraction selon la longueur d'onde. Cependant, cet indice de réfraction varie légèrement avec la température et les radiations. Il est donc nécessaire de se demander dans quelle mesure notre design est sensible à l'indice de réfraction et à sa courbe de dispersion. Certaines pistes de réflexion sont présentées ci-dessous, et détaillées en Annexe L.5.

Une variation de l'indice de réfraction modifie à la fois l'efficacité de diffraction, et les propriétés géométriques de l'élément optique. La modification de l'efficacité de diffraction est guidée par celle de la longueur d'onde de blaze, équation (4.11). Au niveau géométrique, c'est la loi de Snell, équation (4.1), qui décrit la dépendance avec l'indice de réfraction.

Erreur moyenne sur l'indice

Une erreur sur la valeur moyenne de l'indice peut modifier les résultats. Sans modification de la dispersion de l'indice, une approximation de l'indice réel à ± 0.003 évite des pertes supérieures à 1% sur les performances simulées. En termes uniquement de puissance à incidence nulle, des erreurs jusqu'à +0.017 et -0.003 sont permises. Les erreurs de mesures notamment avec un réfractomètre, sont inférieures à ± 0.00004 [94], ce qui ne devrait pas impacter notre concept et ses résultats.

Variation avec la température

La variation de l'indice de réfraction de polymères avec la température peut être décrite par la relation $n = n_0 + k\Delta T$ avec n_0 l'indice de réfraction de base, k le coefficient de température et T la température [119]. Il est possible de calculer le coefficient de température en fonction des propriétés du matériau [120] :

$$k = \frac{dn}{dT} = -\frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{6n}\beta \quad (13.1)$$

avec β qui est le coefficient d'expansion volumique. Soit $\beta_{\text{silicone}} \approx 9 \times 10^{-4}$, on obtient $k(\lambda = 500\text{nm}) = -4.29 \times 10^{-4} [^\circ\text{C}^{-1}]$ après calcul avec l'indice de réfraction mesuré du silicone DC93-500 et la valeur du fabricant pour le coefficient volumique. Ce résultat est beaucoup plus grand ($3.4\times$ environ) que le coefficient du PMMA. Le coefficient k dépend de la longueur d'onde, et pour de grandes différences de température, il peut modifier de façon conséquente les propriétés de dispersion du matériau.

L'insertion de cette dépendance avec la température nous donne les plages de fonctionnement suivantes :

- $\pm 50^\circ\text{C}$ pour conserver l'efficacité de séparation spectrale initiale (cf. modification de la longueur d'onde de blaze avec la température).
- ± 5 à 7°C pour conserver toutes les performances au-dessus de 99% (à incidence nulle et non-nulle), limité principalement par l'effet sur les angles de réfraction. Cet intervalle de température étant relativement restreint, la modification d'indice y correspondant s'apparente à une erreur sur sa moyenne d'environ ± 0.0025 à 0.003 . En condition de fonctionnement dans l'espace, sous hypothèse d'une orbite géostationnaire, la température maximale d'une lentille se trouve autour de 4 à 8°C selon

la configuration choisie (cf. simulations thermiques sur ESATAN[®]). Cependant, au bord du panneau avec un facteur de vue sur l'espace froid s'approchant de 1, elle peut descendre jusqu'à moins de -40°C selon nos simulations. Bien que nos simulations soient soumises à de nombreuses hypothèses, cela indique l'ordre de grandeur de variation de température que l'on peut avoir le long du panneau. Plus le panneau est grand, plus cette zone à basse température est limitée. Il est donc a priori important de connaître la température de fonctionnement théorique, quitte à adapter localement les éléments optiques ou leur placement. Notons que d'après les résultats de vol de SCARLET [5], il est possible d'estimer la température de fonctionnement à moins de 5°C près, ce qui se situe bien dans nos tolérances. Il reste alors à voir si la variation de température tout au long de la mission entre dans nos tolérances, incluant éventuellement l'effet du jaunissement du silicone (a priori négligeable s'il y a un revêtement anti-UV) ¹...

Variation avec les radiations

Les radiations de l'environnement spatial modifient aussi l'indice de réfraction du silicone. La référence [121] fournit une variation pour le verre de moins de -0.74×10^{-11} [/rad]. Or la dose totale d'irradiation en orbite géostationnaire se situe de l'ordre de 5 à 10 krad/an, soit maximum 150 krad pour une mission de 15 ans [122], sans tenir compte d'une éventuelle couche anti-UVs à l'avant de l'élément optique. Si l'on se réfère aux conclusions précédentes sur l'indice de réfraction, une variation d'indice jusqu'à environ ± 0.003 est acceptable, ce qui est trois ordres de grandeur supérieur aux modifications observées pour le verre. Les données pour le silicone sont alors nécessaires pour savoir si la conclusion est la même que pour le verre. A priori en se basant sur les valeurs du verre, la modification d'indice due aux radiations n'est pas primordiale.

Etant donné que l'aspect le plus limitatif est lié à la réfraction, un parallèle peut être fait avec un aplatissement de l'élément optique. Il est dès lors possible de corriger les résultats en modifiant la hauteur du plan des cellules PV. Ainsi, élever la lentille au bords de 10 mm par exemple, permet d'avoir à -40°C des dimensions de cellules beaucoup plus proches de celles à 25°C , et surtout de supprimer la superposition des taches focales. D'autres solutions sont évidemment envisageables, comme une méthode pour chauffer un peu les bords, ou encore de réaliser l'optimisation de l'élément optique aux températures de fonctionnement présumées adaptées à chaque zone du panneau.

En conclusion, l'indice de réfraction est une des propriétés de base qui dicte le comportement optique de notre concentrateur. La connaissance du matériau à utiliser, ainsi que les conditions dans lesquelles le concentrateur devra fonctionner sont importantes pour obtenir un système le plus efficace possible. Notons que sans prendre en compte la tolérance au dépointage, la plage de tolérance en température est assez importante, allant de -37 à $+15$ (-25 à $+20$) $^{\circ}\text{C}$, permettant une mission rencontrant des variations thermiques. Si les variations présumées sont plus importantes, un compromis sur les puissances de sortie devra être fait via le choix du plan focal le plus adéquat sur toute la mission (à moins qu'un système d'adaptation de la hauteur ne soit ajouté).

1. Au niveau du jaunissement, l'absorption du silicone devrait doubler (passant de $\sim 1.5\%$ à $> 3\%$) pour voir sa température augmenter de plus de 5°C .

13.1.5 Approximations sur les valeurs des E_g et λ_{blaze}

Une erreur de concordance entre la longueur d'onde de blaze et la combinaison de cellules PV peut aussi apparaître et réduire les performances. Les deux causes principales pouvant entraîner cette situation sont :

1. une approximation sur les énergies des bandes interdites réelles des cellules PV utilisées, ou une modification due à la température,
2. une déformation du réseau de diffraction (étirement, température, erreurs de fabrication...) modifiant la longueur d'onde de blaze.

Pour avoir une idée des erreurs qui peuvent être rencontrées, deux exemples sont présentés :

1. *Variation de E_g avec la température* : $E_{g,\text{GaAs}}(25^\circ\text{C}) = 1.423 \text{ eV}$, tandis que $E_{g,\text{GaAs}}(70^\circ\text{C}) = 1.403 \text{ eV}$, cf. équation (5.10). Or selon les graphiques 9.2, nous avons conclu que notre concentrateur est assez tolérant sur la combinaison des cellules PV. Une différence de 0.02 eV ne change donc presque pas les résultats. Néanmoins, dans les limites du possible, il est plus favorable de travailler dans la simulation avec l'énergie de bande interdite des cellules à la température de fonctionnement supposée.
2. *Déformation du réseau* : Pour un étirement d'environ 102% comme énoncé précédemment, un changement en longueur d'onde de blaze d'environ 10 nm peut avoir lieu. Cette valeur, inférieure à 5% de la valeur initiale n'induit que peu de modifications sur les performances (< 1% de pertes).

Ainsi, dans les limites de l'effet de la température et de l'étirement prévu de la lentille, les systèmes semblent suffisamment tolérants. Pour les autres erreurs potentielles (erreurs de fabrication sur le réseau et/ou des cellules PV ou une modification des énergies des bandes interdites avec le vieillissement des cellules, etc.), ou leurs combinaisons, une étude au cas par cas est nécessaire. Les effets individuels sont illustrés en Annexe L.6. Un effet combiné peut éventuellement engendrer des dégradations plus conséquentes, la connaissance des cellules PV notamment est donc importante.

Dans l'hypothèse de l'utilisation de cellules PV légèrement différentes de celles de la simulation, il suffit d'adapter la longueur d'onde de blaze selon les graphiques 9.2 (et adaptations ultérieures) pour maximiser la puissance de sortie. Notre concentrateur a l'avantage de ne pas être aussi sensible aux combinaisons de E_g que les cellules MJ (voir section 9.4).

13.2 Matrice de sensibilité et conclusion

Matrice de sensibilité

Les limites de tolérancement discutées dans les points précédents sont reprises dans la Table 13.1.

Notons que certaines erreurs peuvent se compenser, à commencer par une surévaluation de la température : dans ce cas-là, la diminution de l'efficacité de séparation spectrale due au rétreint sera partiellement compensée par l'accroissement de l'efficacité des cellules PV. Un étirement dû au déploiement par exemple sera aussi réduit si la température est plus élevée (dilatation). De même, un rétreint dû à une diminution de température peut être partiellement compensé par l'augmentation de l'indice de réfraction et inversement. On peut d'ailleurs éventuellement utiliser ces effets inverses lors du design pour corriger à l'avance une erreur présumée.

Erreur	$P_{out} \approx 99\%$	Fraction de $P_{out} 0.8^\circ$	Valeurs estimées
BLAZE			
Angle de dépouille réseau	10°	99%	1°
Angle de dépouille lentille	2°	99%	2°
Arrondi (rayon de courbure de l'outil)	$20 \mu\text{m}$	99%	$< 30 \mu\text{m}$
Erreur sur Λ *	10%	98%	$< \pm 0.1\%$ diamond turning
Aplatissement * (largeur fixe)	98 à 102%	97.5 à 97%	$\approx 102\%$ cf. maintien
Etirement * (largeur et hauteur)	99 à 102%	99 à 95%	$\approx 102\%$ cf. maintien
Courbure (flèche)	-7 à 10 mm	95 à 94%	
Parallélisme réseau/lentille *	0.5°	80%	$< 0.06^\circ$ (cf. atan(0.1mm/100mm))
$E'_{g,1}/E_{g,1}$ *	0.96-1.025		
$E'_{g,0}/E_{g,0}$ *	0.87-1.11		
$\lambda'_{blaze}/\lambda_{blaze}$ *	0.85-1.2		
Décalage des cellules	0.5 mm	90%	0.1mm (mécanique)
Erreur dist. focale	-3 à 2 mm	99 à 97%	0.1mm (mécanique)
Inclinaison	1.5°	90%	
par rapport au panneau			
ΔT pour $n(T)$ *	-25 à $+20^\circ\text{C}$	94 à 98%	$\pm 5^\circ\text{C}$ sur la température prévue [123]
LAMELLAIRE			
Angle de dépouille réseau	10°	99%	1°
Angle de dépouille lentille	2°	98.5%	2°
Arrondi (rayon de courbure de l'outil)	$20 \mu\text{m}$	99%	$< 30 \mu\text{m}$
Erreur sur Λ *	10%	99%	$< \pm 0.1\%$ diamond turning
Aplatissement * (largeur fixe)	99 à 102%	99 à 95%	$\approx 102\%$ cf. maintien
Etirement * (largeur et hauteur)	99 à 102%	99 à 95%	$\approx 102\%$ cf. maintien
Courbure (flèche)	-7 à 7 mm	97 à 100%	
Parallélisme réseau/lentille *	0.25°	90%	$< 0.06^\circ$ (cf. atan(0.1mm/100mm))
$E'_{g,1}/E_{g,1}$ *	0.975-1.05		
$E'_{g,0}/E_{g,0}$ *	0.9-1.09		
$\lambda'_{blaze}/\lambda_{blaze}$ *	0.9-1.04		
Décalage des cellules	0.5 mm	88%	0.1mm (mécanique)
Erreur dist. focale	-2 à 3 mm	97%	0.1mm (mécanique)
Inclinaison	1°	90%	
par rapport au panneau			
ΔT pour $n(T)$ *	-37 à $+15^\circ\text{C}$	94 à 98%	$\pm 5^\circ\text{C}$ sur la température prévue [123]

TABLE 13.1 – Résumé des effets des déformations et erreurs de fabrication étudiées, pour les configurations lamellaire et blazée. Les erreurs repérées par « * » sont corrigibles dans la mesure où elles ne sont pas trop importantes, et sont connues avant la finalisation du montage du panneau solaire. Il est ainsi possible (1) d'adapter la forme de la lentille selon la période réelle du réseau utilisé, (2) d'ajuster la distance du plan des cellules PV, (3) de modifier la longueur d'onde de blaze selon les cellules PV ou encore (4) d'adapter le design pour la température de fonctionnement attendue. Des informations supplémentaires concernant les effets des différentes erreurs sont reprises en [Annexe L](#). Remarque : les tolérances de chacun des aspects repris dans cette table seront légèrement modifiées selon les choix de paramètres des designs.

Conclusions

Ce chapitre a pour objectif de répertorier les erreurs principales qui réduisent les performances de notre concentrateur, et de déterminer quels sont les paramètres limitatifs et très sensibles. Au vu des remarques précédentes et de la Table 13.1, le concentrateur semble suffisamment tolérant compte tenu des précisions de fabrication standards. Cependant, quelques points sont à surveiller et vérifier au cas par cas :

- L’inclinaison de l’élément optique par rapport au panneau est assez sensible. Le système de déploiement choisi devra donc satisfaire à ce critère de parallélisme.
- La correspondance de la longueur d’onde de blaze et des énergies de bandes interdites de cellules devra être vérifiée aux températures opérationnelles théoriques.
- Il est nécessaire d’utiliser l’indice de réfraction dans les conditions de fonctionnement présumées, de sorte à prendre en compte sa dépendance avec la température et les radiations. Des études sur son évolution présumée durant la mission sont indispensables afin d’assurer les performances du système EOL.
- Le design doit être fait à la température présumée de fonctionnement, notamment pour l’indice de réfraction, mais aussi pour les énergies des bandes interdites des cellules PV et les éventuels rétreints. Le gradient de température le long du panneau doit être pris en compte.
- Les distances et positions des cellules par rapport aux éléments optiques doivent être optimisées lors du montage final du concentrateur de sorte à prendre en compte les erreurs de fabrication.
- Le dépointage selon l’axe cylindrique du concentrateur est limité par la tolérance sur la distance focale effective, à une valeur de ± 6 à 11° .
- De façon générale, l’efficacité du système est directement proportionnelle à l’efficacité du réseau de diffraction, qu’il faut donc réaliser le réseau avec précaution.

Les erreurs n’ont pas toutes été combinées. Si un système est construit et que toutes les données sont accessibles, établir un cas réaliste via une statistique de Monte Carlo pourrait être intéressant.

Un budget d’erreur a néanmoins été établi dans le cas concret de la configuration avec un réseau blazé. Ce dernier tient compte des erreurs de fabrication dans l’optimisation de l’alignement, de telle sorte que les seuls contributeurs à la dégradation des performances sont :

- un angle de dépouille de 2° et un arrondi dû à un outil de $30\ \mu\text{m}$ de rayon,
- 5°C d’erreur sur la température de fonctionnement : modification de l’indice de réfraction, de la forme, de la distance focale et de la longueur d’onde de blaze,
- une élongation à 102% : modification de la forme et de λ_{blaze} ,
- une inclinaison lentille/panneau de 0.2° [5].

Pour la configuration blazée, nous obtenons un facteur de perte sur la puissance à incidence nulle d’environ 96.5%, dans le cas où la hauteur du plan focal est adaptée à l’extension présumée de la lentille. Les principaux contributeurs sont l’angle de dépouille ($\sim 1\%$), l’arrondi ($\sim 1.5\%$) et l’extension ($\sim 0.5\%$). L’inclinaison et la différence de température ne sont responsables que de 0.35 et 0.07% de pertes. Sans l’adaptation du plan focal, les pertes seraient plus de 2.7% supérieures. Les performances au $\theta_{90\%}$ sont réduites à 95.8% de leur valeur initiale. La différence de longueur d’onde de blaze est à l’origine de moins de 0.05% de dégradation des performances.

Chapitre 14

Déploiement et bilan de masse

Après avoir évoqué les aspects optiques, électriques, thermiques, et de tolérancement, il reste à aborder succinctement les possibilités de déploiement en vol du concentrateur. En posant des hypothèses sur un système de déploiement plausible, nous pourrions aussi établir un premier bilan de masse.

14.1 Mécanismes possibles pour le déploiement

L'ajout d'un concentrateur solaire à déployer présente déjà une sérieuse contrainte en lui-même. Il est dès lors inutile de le complexifier davantage, on favorise donc les mécanismes relativement simples et fiables, excluant les systèmes actifs (systèmes à vis ou gonflables) ou trop complexes (stacers, bras télescopiques, ... inadaptés surtout considérant la faible hauteur de déploiement (environ 15 cm)). La configuration plane du concentrateur permet l'utilisation de systèmes de déploiements verticaux, sans ajout de place de stockage dû à une éventuelle courbure de la lentille. Néanmoins, d'autres approches peuvent être aussi cohérentes, comme l'utilisation de ressorts à torsion pour redresser le tout. Les configurations de déploiement linéaires les plus simples et communément utilisées sont principalement les systèmes à base de « storable tubular extendible masts » (STEM). Par ailleurs, il est aussi envisageable d'exploiter le mécanisme de déploiement du panneau solaire pour initier celui du concentrateur. Ces solutions sont présentées dans les points suivants, pour conclure sur une option plausible, utilisée dans la section suivante pour le bilan de masse.

14.1.1 Storable tubular extendible masts (STEM)

Définition

L'élément de base s'appelle « tape spring ». C'est une bande de matériau de section courbe lorsqu'il est sans contrainte. Sous cette forme, le tape spring est rigide et adapté à une utilisation comme montant. L'intérêt de ce type d'élément est que sa section courbe peut être aplatie, ce qui le rend facile à stocker (enroulé autour d'une bobine par exemple), comme l'illustre la Figure 14.1. Lorsque la contrainte d'enroulement et de forme aplatie est levée, le tape spring retourne naturellement à sa forme d'origine, et recouvre sa rigidité. Grâce à ces caractéristiques, leur simplicité et leur bas coût, ils ont largement été utilisés pour les structures déployables dans le spatial [124].

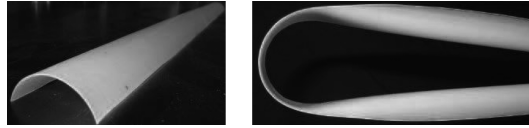


FIGURE 14.1 – Exemple de tape spring déployé et plié [125].

Différentes formes peuvent être utilisées selon les propriétés mécaniques que l'on souhaite : soit un simple élément, soit un double, soit sous forme de lentille (deux tape springs symétriques soudés aux bords), etc. [126] La forme en lentille est souvent employée car grâce à sa section fermée, elle présente de bonnes propriétés structurales comparées aux autres formes ouvertes. Point de vue matériau, c'est souvent du BeCu qui est employé [126], mais des essais ont aussi été démontrés en CFRP, ou en fibres de carbone [127], et d'autres matériaux sont tout à fait envisageables. Ceci bien sûr définit aussi les capacités de déploiement et les propriétés mécaniques une fois déployé. Notons que le rayon de courbure maximum du tape spring est souvent un paramètre crucial puisqu'il détermine généralement le volume de stockage minimal du système de déploiement. Un rayon de courbure typique se situe autour de 16 mm, mais dépend des caractéristiques du matériau choisi et de la configuration utilisée.

Déploiement vertical

(a) Système de déploiement de SCARLET

L'approche la plus évidente pour notre application est de repartir du système de déploiement développé pour l'application SCARLET, représenté en Figure 14.2 : des BeCu tape springs sont pliés sur le bord, et lorsque le déclencheur les libère, ils retrouvent leur rectitude, déploient le concentrateur et redeviennent très rigides. Cette option a été choisie parce qu'elle permet des alignements très précis, n'induit pas de friction, a une faible énergie stockée, est légère et a déjà été employée dans le spatial. L'alignement d'un concentrateur est évidemment critique puisqu'il dépend de l'as-

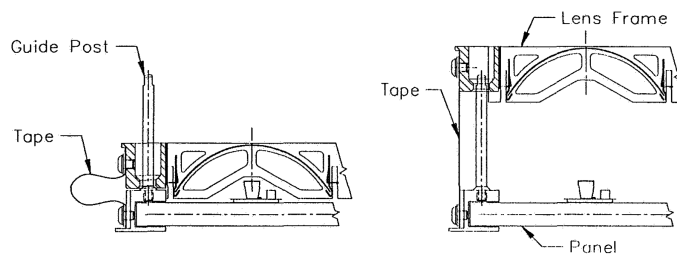


FIGURE 14.2 – Exemple de système de déploiement ayant déjà fonctionné sur SCARLET [128].

semblage de tous les éléments (cellules PV, modules, lentilles, panneaux, charnières, etc.). Pour le concentrateur SCARLET, c'est lors des essais en vol que cette précision a pu être testée [123]. Les résultats principaux du vol sont un fonctionnement nominal du concentrateur, avec un très bon alignement à environ $\pm 0.175^\circ$ de l'angle de design [5].

(b) Stockage enroulé

Le tape spring peut aussi être stocké enroulé comme illustré par la Figure 14.3. En plaçant verticalement l’axe de déploiement, le déroulage peut présenter une solution pour déployer notre concentrateur. Le déploiement peut être soit motorisé, soit passif (« self-extended »). Dans tous les cas, la vitesse de déploiement doit être régulée, soit via le moteur, soit via un régulateur passif [126]. Beaucoup d’études se font sur ce type de systèmes de déploiement, notamment vers des systèmes bistables, c.-à-d. possédant deux configurations favorites : complètement enroulé et complètement déroulé [127] qui présentent certains avantages au niveau de l’énergie de stockage qui est donc réduite, et la vitesse de déploiement qui peut être relativement contrôlée. Un exemple de déploiement est visible suivant le lien de la référence [129].

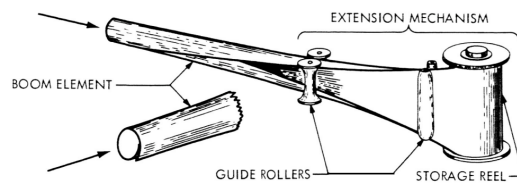


FIGURE 14.3 – Exemple de système de déploiement sur base de STEM enroulé [126].

(c) Autres

D’autres systèmes sont possibles, à partir notamment de montants capables de reprendre leur forme initiale une fois la contrainte relâchée. C’est le cas des configurations proposées en références [130, 131]. Malgré le faible volume de stockage, la question reste principalement la qualité du recouvrement de la forme initiale après une longue période sous contrainte. Néanmoins, ce type d’élément a déjà démontré sa versatilité et peut sans doute offrir d’autres solutions plus adaptées et ingénieuses dans notre cas, mais nécessitant de plus amples réflexions.

Déploiement à partir d’une position couchée

Il est aussi possible de travailler avec des tape springs non-pas stockés enroulés, mais simplement à 90° , de sorte qu’initialement ils soient parallèles au panneau solaire, et que lors du relâchement de la contrainte, ils se redressent à la verticale. C’est ce qu’illustrent les Figures 14.4 et 14.5, avec deux approches différentes. La seconde proposition est par ailleurs compatible avec un panneau solaire flexible, stocké enroulé.



FIGURE 14.4 – Exemple de séquence de déploiement [125].

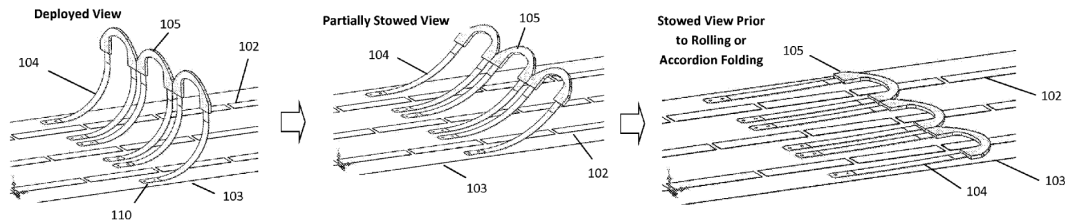


FIGURE 14.5 – Exemple de séquence de déploiement [16].

14.1.2 Exploitation du mécanisme de déploiement du panneau

Une autre approche est d'utiliser le mode de déploiement du panneau pour déployer le concentrateur. Par exemple, supposons que chaque arche de support du concentrateur soit articulée sans contrainte. Lors du déploiement du panneau, les lentilles se tendent, relevant les arches. Si celles de début et fin sont liées au panneau par des câbles de longueur fixe de sorte à les maintenir à un angle de 90° , toute la structure sera figée avec des arches toutes perpendiculaires au panneau. C'est ce qu'illustre la Figure 14.6. La référence [131] fait aussi usage de ce principe. Bien sûr ce type de déploiement nécessite un panneau y correspondant (mode de déploiement courant), mais aussi implique un pli dans la lentille à la jonction.

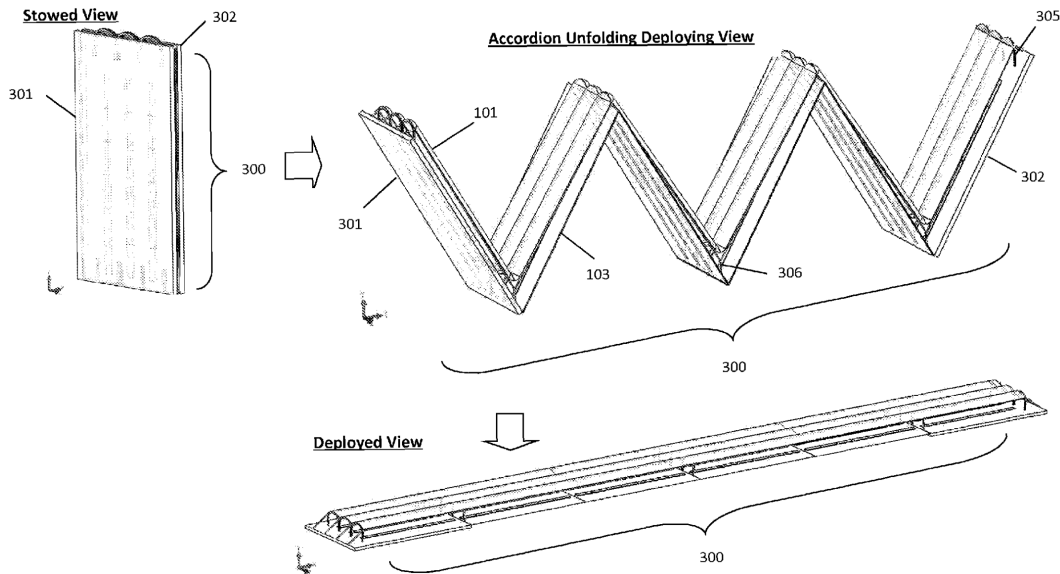


FIGURE 14.6 – Exemple de séquence de déploiement d'un panneau [16].

14.1.3 Ressorts à torsion

Une méthode très simple pour le déploiement est d'utiliser une articulation à la base de l'élément à déployer. Cette jonction peut être une simple charnière couplée à un ressort en torsion. Celui-ci, une fois libéré, force la rotation de la charnière et déclenche le déploiement. Une fois bloqué ou en bout de course, il maintient la structure déployée [124]. C'est cette méthode qui est utilisée pour le déploiement du concentrateur SLA, comme l'illustre

la Figure 14.7 [13].

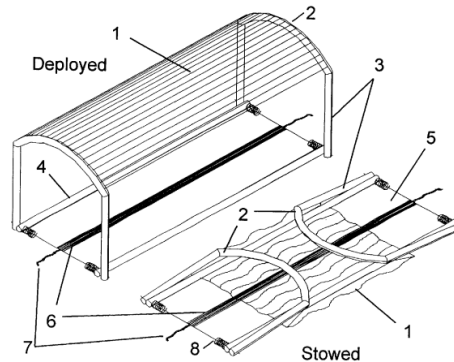


FIGURE 14.7 – Système de déploiement du SLA [13].

14.1.4 Proposition d'un système de déploiement

Au vu des différentes technologies présentées ci-dessus, il semble que les solutions pour le déploiement ne manquent pas, mais réfléchissons pour notre application en particulier.

Pour soutenir les lentilles, des arches solides sont nécessaires dans la direction transverse, qui, si le système de déploiement le permet, seront du même matériau que les montants pour ne former qu'une seule pièce. La lentille est alors collée sur les bords avec du silicone.

Bien qu'un déploiement vertical soit tentant surtout au vu de la planéité du concentrateur, le volume de stockage des systèmes de déploiement à base de tape springs est limité par le rayon de courbure des montants. Ce volume demeure dès lors plus grand que celui des approches à partir d'une position couchée, que ce soit avec des tape springs (Fig. 14.5), des ressorts (Fig. 14.7) ou via le déploiement du panneau (Fig. 14.6). La solution de la Figure 14.5 avec les tape springs ouverts ne semble pas structuellement très précise et fiable. La solution via le déploiement du panneau est intéressante, mais n'est pas adaptable à tout type de panneau. Si l'on se base sur les retours d'expériences en vol dans le spatial, la solution des ressorts semble la plus fiable et modulable. Ces ressorts et surtout la distance entre les montants sont à dimensionner de sorte à obtenir une tension suffisante pour maintenir la forme de la lentille, mais sans endommager structuellement le silicone (un étirement de 101 à 102% semble l'optimum d'après les études sur le SLA [98]). Contrairement à la Figure 14.7, il est aussi envisageable d'avoir un déploiement des ressorts dans le même sens ou latéralement, de sorte à éviter un repliement de la lentille sur elle-même.

Concernant la précision d'alignement, avec une butée pour bloquer le ressort et des montants rigides, elle devrait être suffisamment bonne pour ne pas avoir de problèmes. Rappelons que la tolérance à un décalage lentille/cellules est d'environ 0.1 mm pour tout conserver au-dessus de 99% des performances initiales (cf. section L.4.2).

Le choix du matériau composant les montants est assez libre (composites de carbone, aluminium, titane...) [102].

Améliorations supplémentaires

Si l'on veut aller plus loin dans l'optimisation du déploiement, on peut s'interroger sur le mode de stockage (en accordéon, roulé, ...) et les autres types de panneaux plus légers et flexibles, et donc se diriger vers des solutions comme celles décrites en référence [16]. Il est ainsi aussi possible d'implémenter des solutions plus poussées tirant parti de la flexibilité de la lentille pour contrer des effets thermiques, comme l'insertion de câbles sous tension le long de la lentille maintenus par des ressorts ou éventuellement motorisés, de sorte à contrôler l'extension globale et la corriger en cas d'une trop grande différence de déplacement entre la lentille et le panneau.

Par ailleurs, la solution proposée pour solutionner le problème de déchirure des lentilles SLA lors du vol de TacSat, à savoir l'insertion de câbles dans la lentille pour réduire les contraintes appliquées sur celle-ci, évoquée en section 8.4, est à explorer [102].

14.2 Bilan de masse et comparaison avec un panneau plan

La notion de W/kg est importante pour un panneau solaire spatial, car le coût du lancement au kilogramme est très élevé et définit une large partie du coût global de la mission. Nous savons qu'un des éléments les plus lourds du panneau solaire sont les cellules PV et leur verre protecteur. La concentration solaire réduit la surface de ces deux éléments et donc potentiellement la masse. Cependant, l'ajout d'une structure pour le déploiement et de l'élément optique en silicone compense en partie ce gain de masse. Il est difficile d'établir des paramètres exacts pour le système de maintien de l'élément optique sans une étude poussée des besoins mécaniques et éventuellement des tests de fabrication. Néanmoins, nous avons tenté d'apporter des éléments de réponse quant au gain ou au surplus de masse que pourrait occasionner notre concept de concentrateur.

La Figure 14.8 décrit la configuration choisie pour l'approximation sur le bilan de masse du concentrateur : elle est basée sur des modules de 5×2 lentilles, couvrant $50 \times 50 \text{ cm}^2$. La Table 14.1 reprend les densités des éléments et les dimensions principales utiles pour l'estimation du gain de masse.

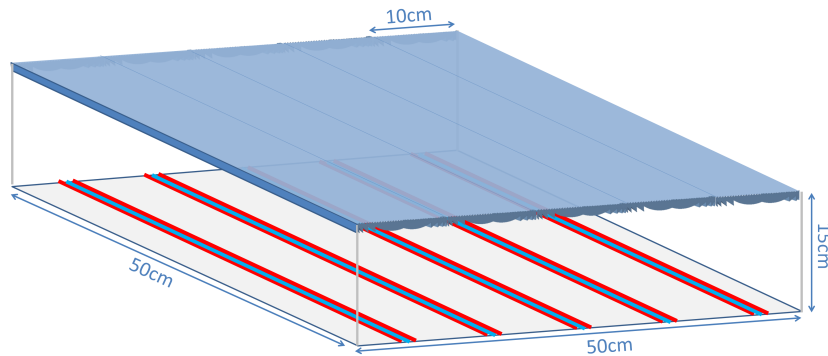


FIGURE 14.8 – Configuration hypothétique pour le bilan de masse. $L = 50 \text{ cm}$, $D = 10 \text{ cm}$.

	Cellules PV	Verre protecteur	Lentille Silicone	Structure Aluminium 7075 T651
Densités de masse	0.084 g/cm ²	2.55 g/cm ³	1.03 g/cm ³	2.81 g/cm ³ [118]
Epaisseurs	/	125 µm	400 µm	1.5 mm de rayon (R)

TABLE 14.1 – Données nécessaires pour établir le bilan de masse : densités de masse et épaisseurs des différents éléments (m_x et d_x).

Les équations suivantes décrivent la masse globale du panneau pour 5 modules :

$$M_{\text{cellules}} = 5.D. \left(\frac{1}{C_{\text{géo IR}}} + \frac{1}{C_{\text{géo VIS}}} \right) .L.m_{\text{cellules}} \quad (14.1)$$

$$M_{\text{verre}} = 5.D. \left(\frac{1}{C_{\text{géo IR}}} + \frac{1}{C_{\text{géo VIS}}} \right) .L.d_{\text{verre}}.m_{\text{verre}} \quad (14.2)$$

$$M_{\text{déploiement}} = 4/4.f_{\text{eff}}.\pi.R^2.m_{\text{Al}} \quad (14.3)$$

$$M_{\text{cadre}} = (5.D.\pi.R^2.2/2 + L.\pi.R^2.2/2).m_{\text{Al}} \quad (14.4)$$

$$M_{\text{silicone}} = 5.D.L.d_{\text{lentille}}.m_{\text{silicone}} \quad (14.5)$$

$$M_{\text{total conc}} = M_{\text{panneau}} + M_{\text{cellules}} + M_{\text{verre}} + M_{\text{déploiement}} + M_{\text{cadre}} + M_{\text{silicone}} \quad (14.6)$$

$$M_{\text{total plan}} = M_{\text{panneau}} + 5.D.L.(d_{\text{verre}}.m_{\text{verre}} + m_{\text{cellule MJ}}) \quad (14.7)$$

Si l'on considère des cellules de même masse que ce soient des MJ ou des SJ, une même épaisseur de verre protecteur, et que l'on ne tient pas compte de la masse du panneau substrat qui est de toute façon la même pour les deux, on peut exprimer le gain sur la masse des cellules et de leur verre protecteur :

$$M_{\text{concentrateur}} = [63\% \text{ à } 68\%].M_{\text{panneau plan}} \quad (14.8)$$

Ce gain est aussi illustré en Figure 14.9.

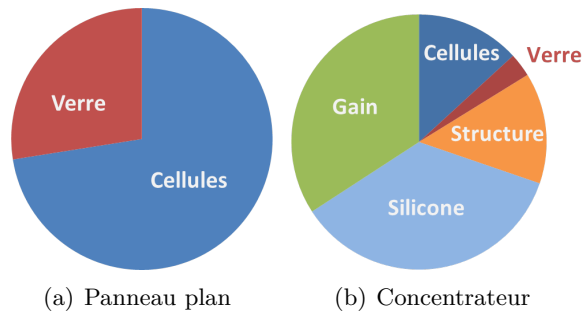


FIGURE 14.9 – Diagrammes représentant la répartition de la masse du panneau hors substrat. Les deux diagrammes sont normalisés avec la somme de la masse des cellules et verre protecteur du panneau plan (a), soit $0.084 \text{ g/cm}^2 + 150\mu\text{m} \times 2.55 \text{ g/cm}^3 = 1.222 \text{ kg/m}^2$. En Figure (b), on observe alors le gain potentiel dû à l'usage de notre concentrateur solaire.

En prenant l'hypothèse d'une masse de panneau sans cellule, identique pour la configuration plane et avec concentrateur ($\sim 1.4 \text{ kg/m}^2$ [132]), on trouve le rapport suivant :

$$M_{\text{concentrateur}} = [83\% \text{ à } 84.5\%].M_{\text{panneau plan}} \quad (14.9)$$

A cet avantage de masse devraient s'ajouter les éléments suivants :

- La masse des cellules SJ est sensée être inférieure à celle des cellules TJ (0.032 g/cm^2 pour une cellule Silicium contre 0.084 g/cm^2 pour une cellule TJ par exemple [133]).
- Le verre protecteur pour la configuration avec concentrateur n'a pas besoin d'être aussi épais que sur un panneau plan puisque la lentille protège déjà en partie des radiations (on devrait gagner $50 \text{ }\mu\text{m}$ [97], soit 2% de gain sans tenir compte du panneau).
- L'épaisseur de l'élément en silicone pourrait être réduite : en référence [34], des lentilles en silicone DC93-500 jusqu'à $87 \text{ }\mu\text{m}$ pour la base et $100 \text{ }\mu\text{m}$ de hauteur pour les prismes ont été réalisées. Avec une moyenne de $150 \text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur de silicone, la masse du panneau complet avec concentrateur passerait à moins de 75% de celle d'un panneau plan équivalent (et moins de 44% sans considérer le substrat du panneau).
- L'épaisseur des montants en aluminium est arbitraire. Une optimisation de cette épaisseur en termes de tenue mécanique, de surface d'accroche pour la lentille est nécessaire. De même, la possibilité d'utilisation d'un tube creux pourrait être avantageuse. D'autres matériaux comme des composites de carbone sont aussi une option pour réduire la masse globale.

Cependant, il n'y a pas d'hypothèses concernant la masse des ressorts et structures permettant le déploiement des lentilles. Néanmoins, ces systèmes devraient déployer une grande surface et donc, à l'échelle d'un module, ne pas être primordiaux. La masse du câblage et de l'électronique doit aussi être prise en compte.

A noter que les montants maintenant les lentilles selon leur axe cylindrique pourraient être éventuellement remplacés par des câbles sous-tendus dans la lentille, ce qui diminuerait encore la masse (des fils pourraient aussi au contraire être ajoutés pour éviter les déformations et déchirures, ce qui augmenterait la masse globale, bien que très légèrement).

La masse globale n'est pas significative seule, elle doit être liée à la puissance de sortie surfacique. D'après le Chapitre 12, notre concentrateur produit en début de vie autour de 80% de la puissance de sortie d'un panneau plan couvert de cellules TJ. En termes de W/kg, nous sommes donc autour de 97% pour le concentrateur par rapport au panneau plan TJ. En réduisant l'épaisseur du silicone à $150 \text{ }\mu\text{m}$, nous passons à plus de 106%, ce qui pourrait encore évoluer vers le haut en prenant en compte tous les éléments cités ci-dessus (épaisseurs de verre protecteur adaptées, masses des cellules réelles, hypothèses pour le déploiement plus précises, ...). L'avantage devrait encore être plus grand en fin de vie puisqu'alors la différence de puissance de sortie entre les deux systèmes (cellules SJ avec séparation spectrale vs. panneau plan avec cellules MJ) se réduit (détails en section 15.2). Nous pouvons donc conclure qu'a priori, le concentrateur solaire devrait avoir des performances en termes de W/kg au minimum équivalentes, potentiellement supérieures, à celles d'un panneau plan couvert de cellule TJ.

Chapitre 15

Bilan des avantages et limites du concentrateur

Nous sommes partis d'un concept de combinaison d'un réseau de diffraction et d'une lentille de Fresnel, pour parvenir à montrer la faisabilité et viabilité d'un tel concentrateur via diverses études. Bien que déjà mentionnés tout au long du développement précédent, nous allons ici tenter de faire le résumé et le bilan des avantages et des limites de notre concept. Ces avantages se répartissent en deux parties : ceux provenant de la concentration solaire, et ceux issus de la séparation spectrale.

15.1 Avantages de la concentration

L'aspect « concentrateur » de notre concept présente les avantages habituels des concentrateurs solaires, grâce à la réduction de la surface des cellules PV et l'usage d'une lentille :

1. *Coût* - La surface de cellules gagnée (cf. taux de concentration global de $5.5\times$ à $6.8\times$, soit une surface réduite à 15-18% de sa valeur initiale) est remplacée par une lentille réalisée avec un matériau à bas coût comparé aux cellules PV, comme illustré en Figure 14.9. Les cellules PV présentant un des coûts les plus élevés au niveau du panneau (pour une même surface, les cellules PV coûtent jusqu'au double du prix du substrat qui les supporte [6]), cette réduction de surface par un facteur > 5 réduit considérablement le coût global. Bien sûr, il faut parler à même puissance de sortie qu'un panneau plan couvert de TJ : la surface de cellules s'élève alors 19-22% de la surface d'un panneau plan fournissant une puissance équivalente. De plus, l'usage de cellules SJ au lieu de TJ réduit davantage le coût. Concrètement, il est difficile de chiffrer cet avantage tellement il dépend de données externes et hors de ma portée. Cependant, avec un intervalle de prix allant de 50 à 100k\$ par m^2 de cellules, et plus de 75% de réduction de la surface des cellules, ainsi que des cellules moins complexes et donc moins coûteuses, on peut affirmer que le gain de coût devrait être intéressant.
2. *Masse* - Le système de déploiement et de lentille est beaucoup plus léger comparativement à une même surface de cellules PV : la masse kg/m^2 est réduite (Chapitre 14.2), la masse effective $[kg/W]$ dépend des performances électriques du concentrateur. A priori, elle devrait au-moins être inférieure à celle d'un panneau plan équivalent couvert de cellules TJ, même en début de vie.

3. *Radiations* - Le placement d'une lentille au-dessus des cellules PV, bien que potentiellement dégradée par les radiations et nécessitant donc une protection, fait office de protection pour les cellules PV contre les radiations, ce qui permet principalement de réduire l'épaisseur du verre protecteur nécessaire sur les cellules, et ainsi de réduire encore la masse du panneau.
4. *Taux de concentration moyen* - Le taux de concentration de l'ordre de $6\times$ (nous sommes en faible concentration) est adapté aux conditions spatiales car à la fois les gains de coût et de masse demeurent significatifs, mais cette faible concentration assure une bonne tolérance du système à l'incidence et aux déformations etc., et évite un trop grand échauffement des cellules PV qui pourrait être problématique.
5. *Missions scientifiques « Deep-Space »* - La concentration solaire accroît le flux solaire reçu au niveau des cellules PV. Dans le cadre de missions scientifiques spécifiques par exemple « deep-space », les conditions ne sont pas favorables pour les cellules : les faibles températures et le faible flux de lumière reçu réduisent drastiquement les rendements des cellules (cf. [Annexe A](#)). La concentration solaire permet de remédier partiellement au problème ou du moins de le repousser pour un temps.

Ces performances pourraient être encore améliorées dans l'hypothèse de cellules PV mono-jonction plus adaptées ou plus performantes (revêtements spécifiques, etc.). Par contre, les taux de concentration atteignables avec ce type de combinaisons lentille/réseau en relief pour un concentrateur cylindrique demeureront inférieurs à $10\times$, à cause de l'étalement des ordres de diffraction qu'il est difficile de réduire, et aussi en raison de la tolérance à l'angle d'incidence imposée. Peut-être qu'un autre matériau (avec une courbe de dispersion différente) pourrait légèrement modifier les résultats, mais le concept restera valable uniquement pour de la faible concentration. Par ailleurs, la tolérance à l'incidence demeure un point difficile à gérer et limitatif sur ces taux de concentration.

15.2 Avantages de la séparation spectrale

Outre la concentration solaire, notre concentrateur est basé sur un principe de séparation spectrale. Ce point pose quelques limitations pour le taux de concentration maximum et la tolérance à l'incidence, mais présente a priori d'autres avantages précieux pour les applications spatiales notamment. Ces avantages proviennent principalement du fait de l'indépendance électrique et physique des jonctions PV utilisées à la place des MJ traditionnelles. Certains avantages sont décrits dans les sections suivantes, dans les limites des informations trouvées. Ils recouvrent l'amélioration de la puissance en fin de vie grâce à une sensibilité moindre aux modifications de spectre (jaunissement du silicone, contaminants, ...) ou au vieillissement différentiel des jonctions, une plus faible sensibilité à une illumination non-uniforme, un choix beaucoup plus libre des combinaisons de cellules PV, et l'adaptation plus aisée à un revêtement dont la réponse spectrale n'est pas constante.

15.2.1 Puissance électrique en fin de vie

L'environnement spatial est particulièrement agressif pour les panneaux solaires, qui subissent sur le temps d'une mission de sérieuses dégradations, dues aux contaminants, aux radiations, etc. Un exemple de dégradation de satellites GPS au cours du temps est repris en Figure [15.1](#) : ces satellites subissent plus de 40% de dégradation en moins de 8

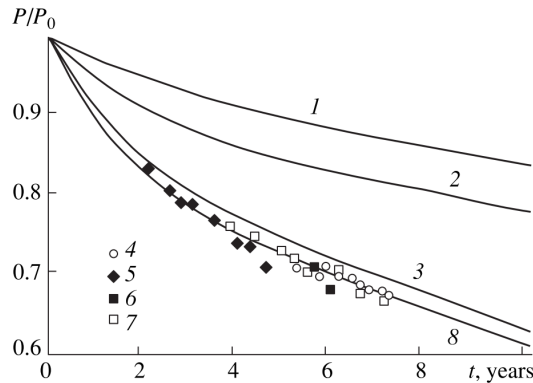


FIGURE 15.1 – Pertes des panneaux solaires de satellites GPS : (1) contamination, (2) radiations ionisantes, (3) radiations ionisantes + contamination, (4-5-6-7) données de satellites GPS, (8) effet intégral [134].

années de missions. La séparation spectrale a la capacité de réduire ces pertes, et notre concentrateur a donc l'ambition de parvenir à une puissance en fin de vie (EOL) supérieure à celle des systèmes classiques à MJ.

Le principal avantage du concentrateur avec séparation spectrale est de diminuer sa sensibilité par rapport à un changement de spectre/dégradation/vieillessement différentiel(le) entre les jonctions des cellules PV. Puisqu'ici elles sont séparées spatialement, on évite de dégrader l'ensemble si seule une jonction est atteinte, ce qui est le cas pour les MJ où les jonctions sont connectées en série par définition. Ainsi, la séparation spatiale devrait permettre d'atteindre une puissance en fin de vie ($P_{\text{out EOL}}$) supérieure aux systèmes basés sur des MJ. Les facteurs de dégradation peuvent être de différentes natures. On peut citer les principaux :

- le jaunissement du silicone, modifiant le spectre incident sur les cellules,
- la contamination et principalement les contaminants photo-fixés sous VUV, modifiant le contenu spectral parvenant sur les cellules,
- la dégradation des rendements des cellules sous radiations,
- etc.

Nous allons explorer ces différents facteurs dans les limites des données accessibles, pour tenter de comprendre les avantages possibles de cette séparation spectrale. Cependant, ces types de dégradation sont très difficiles à simuler, on leur donne d'ailleurs habituellement uniquement des facteurs empiriques, les modèles étant trop complexes et incertains. Il est donc a priori compliqué de donner des valeurs quantitatives. L'ambition n'est donc pas de parvenir à des résultats exacts en fin de vie, mais simplement de présenter les pistes de réflexion.

(a) Effets des VUV sur le silicone

Comme nous l'avons vu en section 8.3, le silicone est sensible aux UV, principalement sous 200 nm de longueur d'onde. Ceux-ci ne posent pas de problèmes pour les applications terrestres puisqu'ils sont absorbés par les gaz dans l'atmosphère, mais ce n'est pas le cas dans l'espace, d'où le fort contenu en UV du spectre solaire AM0.

Des méthodes de simulation de ce jaunissement en fonction de la dose cumulée d'UV reçue ont été mises au point. L'équation utilisée ici pour simuler l'évolution de la transmittivité (augmentation de l'absorption) du silicone en fonction de l'irradiation UV est celle des références [79, 135], détaillée en [Annexe M](#). Sans verre protecteur, la transmission du silicone diminue fortement dans le visible (Fig. 6.3), impactant principalement les cellules PV à grandes énergies de bande interdite, soit la première jonction des MJ. Sans protection et après 15 ans, le facteur de dégradation simulé donne la Figure 15.2. Cependant, dans l'hypothèse d'un revêtement anti-UV, les pertes sont beaucoup moins grandes. C'est notamment le cas avec le revêtement décrit au point 8.3 : réfléchissant les UV, le jaunissement est très faible.

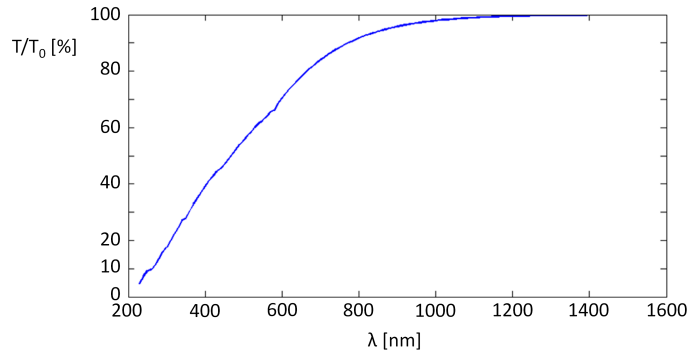


FIGURE 15.2 – Rapport de la transmission au travers d'un film en silicone avant et après une exposition de 130 000h d'UVs (équivalent à environ 15 ans de mission dans l'espace) : la dégradation a principalement lieu dans les plus courtes longueurs d'onde.

Un exemple de simulation de résultats est repris en Figure 15.3 dans le cas sans revêtement : relativement, on observe l'importance de la dégradation des performances dues au jaunissement du silicone, ainsi que la plus faible dégradation de notre concentrateur grâce à la séparation spectrale.

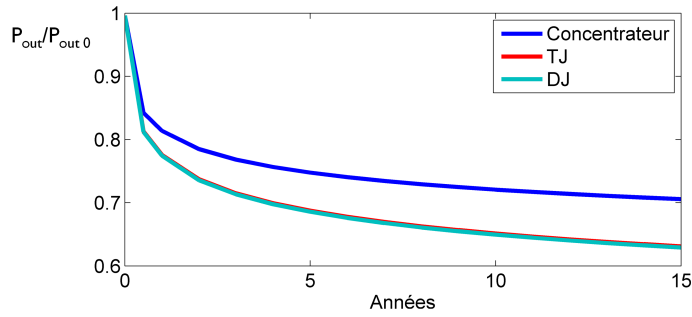


FIGURE 15.3 – Evolution relative des performances électriques (P_{out}) de notre concept et d'un panneau à concentration sur des MJ en fonction de la dose accumulée d'UV reçue au cours du temps, sans revêtement réfléchissant aux UV.

Cependant, ces résultats donnent une dégradation relative. En intégrant les puissances en début de vie (BOL) trouvées précédemment (avec les cellules réelles, c.-à-d. pas exactement à l'optimum du concentrateur), notre concentrateur rejoint à peine les performances de celui avec des TJ après 15 ans, mais surpasse celles d'une DJ dès 2 ans. En réalité bien

sûr, un revêtement anti-UV est ajouté, auquel cas la dégradation s'élève à maximum 3%, soit inférieure à la différence entre les puissances BOL : la plus faible dégradation de notre concentrateur ne permet dès lors pas de compenser son retard BOL.

Néanmoins, sans le revêtement, ce résultat illustre bien la forte sensibilité des systèmes à MJ et l'amélioration que pourrait apporter une séparation spectrale dans ce contexte. Les résultats dépendent évidemment de la performance du revêtement, des combinaisons de cellules PV choisies, et des puissances initiales.

(b) Effets des contaminants

Les contaminants sont souvent la cause des plus grandes dégradations des surfaces optiques, entraînant entre autres une modification du spectre transmis et dégradant par conséquent les performances des cellules PV, comme décrit en sections 6.3 et 6.4.

Pour nos simulations, nous avons opté pour un film de contaminants photo-fixés, après 15 ans d'exposition aux radiations (valeurs comprenant le noircissement avec le temps). Le coefficient d'absorption a déjà été présenté, c'est le coefficient moyenné de la Figure 6.6.

Les résultats des simulations sont visibles en Figure 15.4 : comme avec le jaunissement du silicone, la plus faible sensibilité de notre concentrateur est évidente, et il devient supérieur aux deux autres solutions dès 0.07 μm (DJ) et 0.15 μm (TJ).

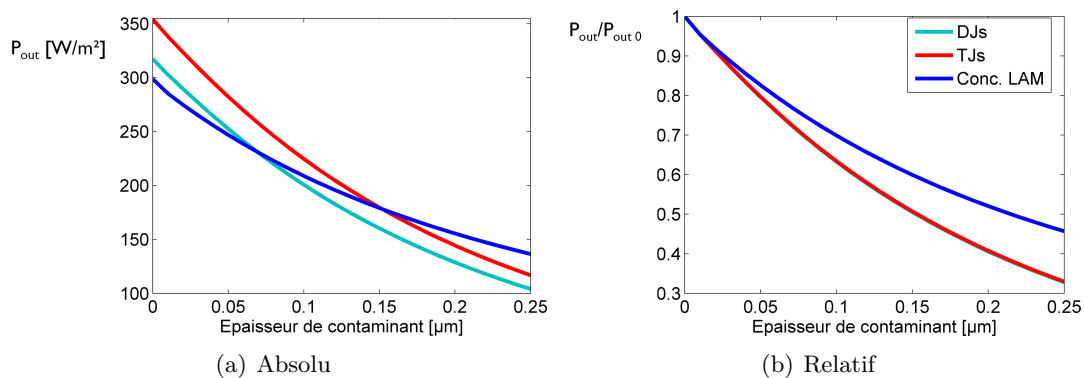


FIGURE 15.4 – P_{out} (a) et dégradation relative (b) selon l'épaisseur de contaminant pour notre concentrateur lamellaire et un concentrateur simple focalisant respectivement sur une DJ et une TJ. Le concentrateur avec séparation spectrale démontre une plus faible sensibilité et devient meilleur que celui à TJ au-dessus d'une épaisseur de 0.15 μm .

Les épaisseurs de contaminant peuvent s'élever jusqu'à 0.2 μm dans le cas de panneaux plans [136], rendant dans ces cas extrêmes la séparation spectrale intéressante. L'avantage pourrait d'ailleurs être plus marqué pour une contamination spécifique ayant par exemple un pic d'absorption sur un intervalle de longueurs d'onde assez court : même pour de faibles épaisseurs, l'effet est alors drastique sur une des jonctions de la MJ et donc sur toute la cellule, mais moyenné pour nos cellules indépendantes.

(c) Effets des radiations

L'environnement spatial en termes de radiations a été abordé en section 6.2. Nous y avons mentionné que chaque cellule PV destinée à une application spatiale est caractérisée par un facteur de dégradation dépendant de la dose de radiations reçue présumée (selon l'orbite - LEO et GEO - et la durée de mission).

Dans notre cas, nous pourrions profiter du fait que les cellules sont séparées spatialement pour choisir une combinaison de cellules PV moins sensibles aux radiations. Mais déjà simplement avec les mêmes jonctions séparées électriquement, nous pourrions voir l'avantage de notre concentrateur par rapport à un système avec des MJ.

Le problème des MJ provient de la différence de dégradation entre les jonctions. Pour exemple, l'effet des protons sur les EQEs est donné en Figure 15.5. Dans ce cas-là, la seconde jonction GaAs peut devenir limitative pour toute la cellule PV. Dans notre cas, l'effet sera limité à la jonction concernée seule. C'est la même chose pour l'effet des électrons, cf. Figure 15.6. La différence de sensibilité entre certains types de cellules PV est décrite dans la Figure 15.7.

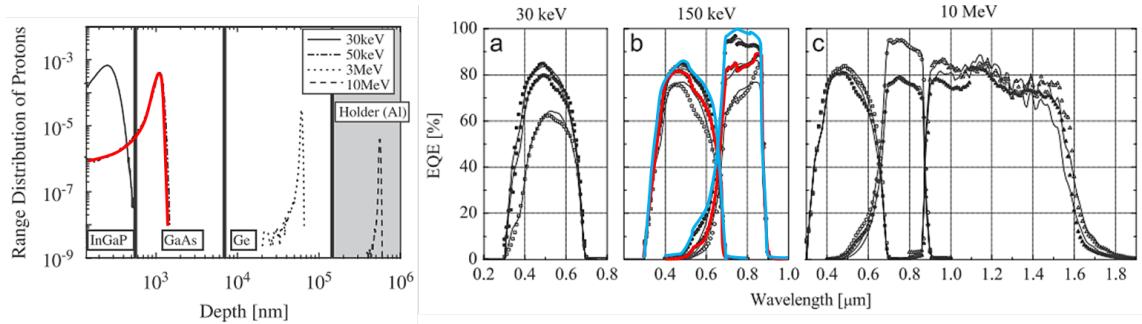


FIGURE 15.5 – Exemple de dégradation de l'EQE d'une cellule TJ sous une irradiation de protons [137]. Dans le cas à 150 keV, la seconde jonction peut devenir limitatrice. Les courbes initiales sont tracées en bleu clair, et celles suite à la dégradation (pour $10^{11} p^+ / \text{cm}^2$) sont en rouge.

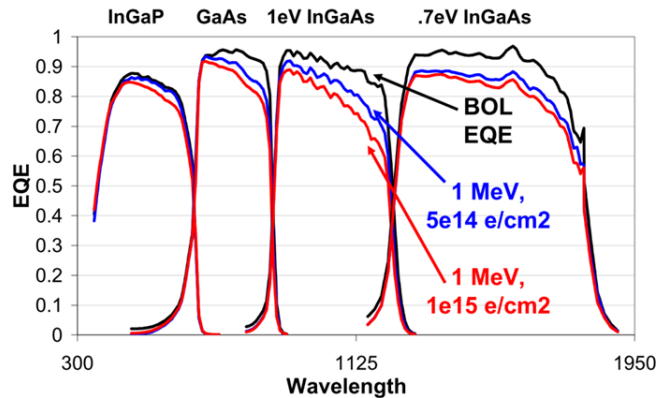


FIGURE 15.6 – Exemple de dégradation de l'EQE d'une cellule à quatre jonctions, pour une irradiation d'électrons [138].

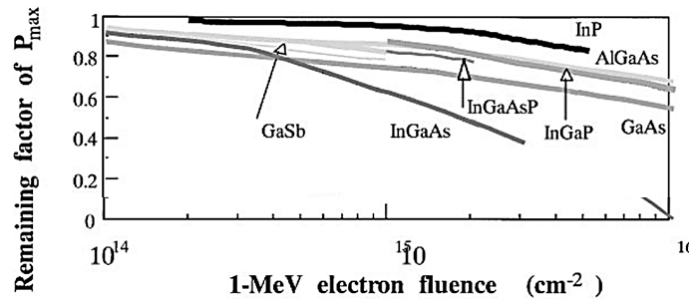


FIGURE 15.7 – Comparaison de la résistance aux radiations des différentes cellules PV selon le type de matériau les composant [139].

Les effets des radiations modifient à la fois les EQEs, la tension à circuit ouvert et le FF, ce qui rend difficile toute simulation du phénomène. En général d'ailleurs, les pronostics sur la dégradation en fin de vie des cellules spatiales se basent sur des facteurs de dégradation globaux empiriques. Pour nos simulations, nous aurions besoin des dégradations spectrales des cellules nous concernant à la fois en termes d'EQEs, de V_{oc} et FF. La seule solution plausible est d'utiliser les facteurs de dégradation globaux donnés dans les fiches techniques, posant comme hypothèse que sur la gamme de longueurs d'ondes de la cellule, la dégradation est approximativement uniforme, tout comme le spectre reçu. Ce n'est pas tout à fait exact évidemment, mais cela peut déjà donner une idée des comportements face aux radiations. Des exemples de valeurs sont repris en Table 15.1 : on imagine aisément que l'on a des pertes supplémentaires dans une cellule MJ à cause du facteur de dégradation de la cellule GaAs qui est supérieur à celui de l'InGaP, justifiant le taux de dégradation de la cellule DJ de l'ordre de sa cellule GaAs.

Cellule	Flux 1 MeV e^-	$V_{oc}/V_{oc\ 0}$	$I_{sc}/I_{sc\ 0}$	FF/FF_0	η/η_0
InGaP/GaAs	10^{15}	0.92	0.83	0.97	0.74
GaAs (CESI)	10^{14}	0.96	0.97	?	0.93
	10^{15}	0.89	0.85	?	0.76
InGaP	10^{14}	0.9938	0.99	0.992	0.976
	10^{15}	0.96	0.91	0.96	0.8387
Si (AzurSpace)	10^{14}	0.91	0.99	0.90	0.80
	10^{15}	0.89	0.85	0.98	0.74

TABLE 15.1 – Facteurs de dégradation de différentes cellules pour le spatial, provenant de leurs fiches techniques.

Pour notre concentrateur, à un flux de $10^{15} e^-/cm^2$ (1 MeV e^-), on a un facteur de dégradation global de 0.7985, ce qui est meilleur que celui de la cellule la plus sensible (Silicium), alors que la DJ renseignée a un facteur de dégradation inférieur à celui de sa jonction la plus sensible (GaAs). On voit donc bien l'avantage que pourrait présenter le concentrateur, à la fois par son indépendance électrique (facteur de dégradation moindre), et par la possibilité de choix de cellules plus résistantes aux radiations (ce qui n'a pas été le cas pour la simulation). Par ailleurs, la concentration protège les cellules des radiations via son élément optique, et permet aussi une encapsulation plus efficace de chaque cellule (éventuellement adaptée à chacune).

Cependant, en travaillant avec des cellules qui ont le même ordre de grandeur de facteur de dégradation, le désavantage en puissance BOL avec les cellules SJ actuellement choisies

n'est pas encore compensé en EOL. Ainsi, pour constater une différence et un avantage, il faudrait soit :

- utiliser des cellules avec des tolérances aux radiations plus élevées,
- considérer un environnement plus radiatif,
- et/ou améliorer les modèles de dégradation des cellules (tenant compte du spectre incident qui peut constituer un avantage pour nous).

15.2.2 Effets d'une illumination non-uniforme

Outre les effets de l'environnement spatial, la séparation spectrale réduit aussi la sensibilité aux effets d'inhomogénéité d'illumination au niveau des cellules, inhérents à la concentration solaire.

Il y a deux types d'illumination non-uniforme, causant des pertes dans les MJ notamment : (1) une illumination non-uniforme en intensité, et (2) une illumination spectralement non-uniforme. La première va causer une répartition horizontale non-uniforme, et donc des courants transverses dans la cellule, d'où les pertes dues aux résistances série. La seconde cause une incohérence verticale locale entre les jonctions : selon la capacité à s'étaler, la règle du courant minimum peut s'appliquer localement aussi et induire de larges pertes.

Pour les deux types d'inhomogénéités, des modèles 3D complexes existent [56, 140, 141, 142], décrivant les relations entre les jonctions via un réseau 3D de résistances. Ces modèles permettent de reproduire les courants transverses et les pertes attendues, en fonction d'un grand nombre de paramètres. Cependant, outre leur complexité, ils ne donnent pas encore aujourd'hui des résultats probants et parfaitement corrélés avec les mesures expérimentales. Ces phénomènes sont encore un peu obscurs. Par contre, des résultats basés sur des paramètres globaux donnent déjà une bonne idée de l'ordre de grandeur des pertes que l'on peut attendre. On distingue deux paramètres pour décrire l'importance de ces inhomogénéités : (1) le rapport entre le maximum et la moyenne en intensité sur la cellule, et (2) le « spectral matching ratio » relatant la correspondance spectrale entre les cellules.

La faible concentration assure de faibles pertes dues à des différences d'intensité sur la cellule. En Figure 15.8(a), on peut voir un exemple de la distribution du photocourant sur les trois cellules : le rapport entre le max et la moyenne demeure sous 3, ce qui est tout à fait acceptable [140, 143, 144]. Pour un concentrateur classique, on se situe de 4 à 5×, accentuant les pertes de près du double, d'autant plus que pour les MJ, les pertes dues à l'inhomogénéité spectrale s'ajoutent, comme l'illustre le graphique 15.8(b).

Ces effets spectraux peuvent être importants (jusqu'à plusieurs dizaines de % de pertes selon le taux d'inhomogénéité spectrale) [56]. C'est d'ailleurs pour cette raison que de nombreuses études portent sur des méthodes d'homogénéisation du spectre, via un meilleur design de la lentille [145], l'usage de concentrateurs secondaires remplissant le rôle d'homogénéisateur [57, 109], ou encore par d'autres méthodes d'achromatisation [110].

Des exemples d'effets du rapport du pic sur la moyenne, et de l'inhomogénéité spectrale sur l'efficacité d'une cellule sont repris dans les Figures 15.9 et 15.10. La première figure montre clairement l'avantage et les dégradations dues à l'inhomogénéité spectrale (photocourants spatialement différents) sur une cellule MJ.

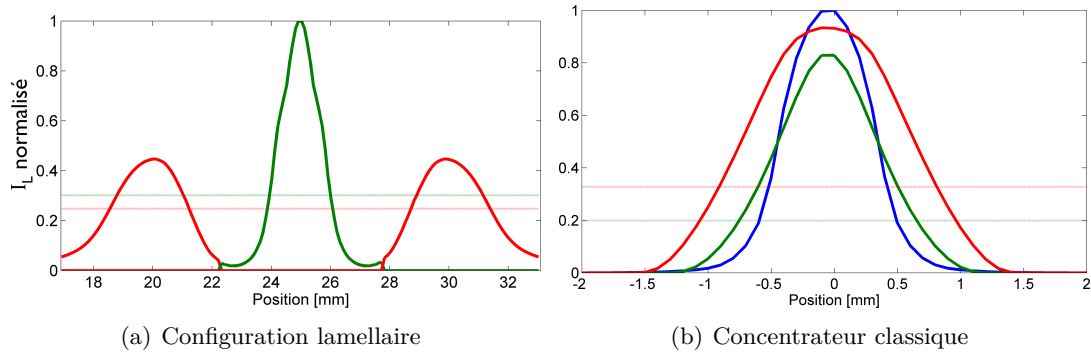


FIGURE 15.8 – Photocourants relatifs produits par les trois cellules PV dans la configuration lamellaire (a) et dans le cas d'un concentrateur classique focalisant sur une MJ (b). Les lignes horizontales représentent les moyennes respectivement pour les cellules IR (rouge) et VIS (vert).

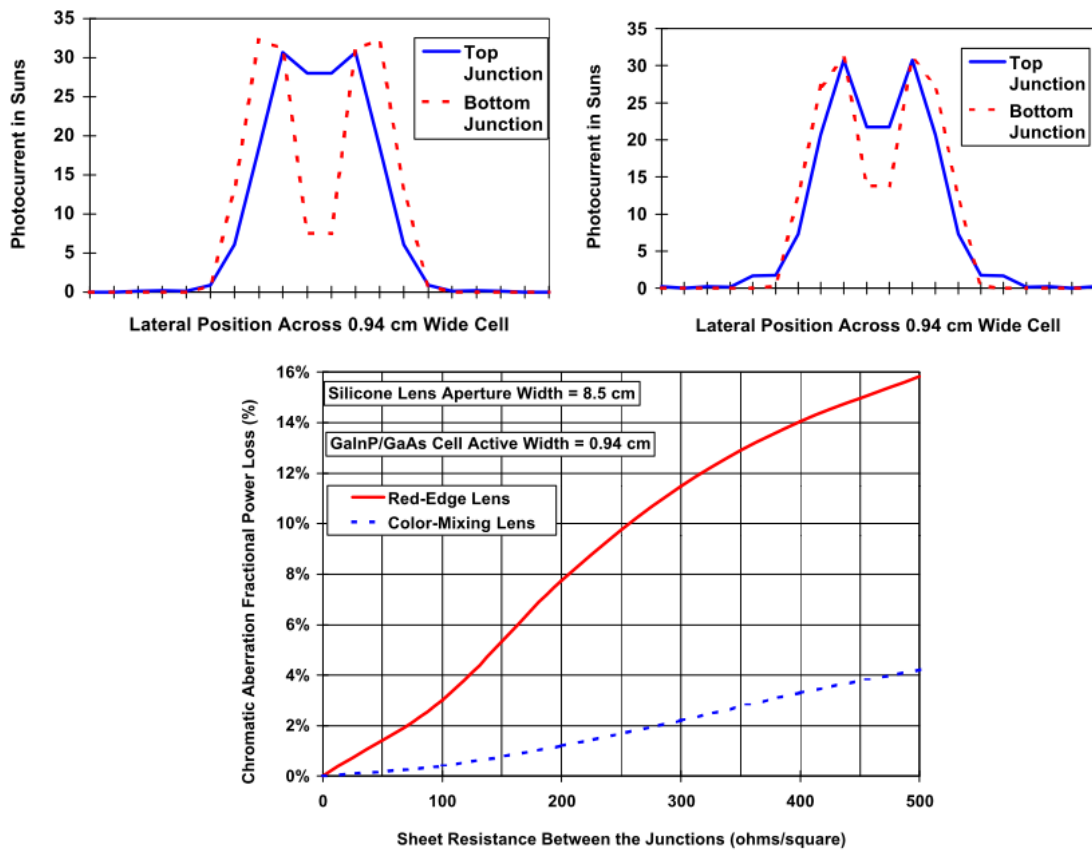


FIGURE 15.9 – Profil des photo-courants pour un concentrateur classique (en haut à gauche) et la version SLA (en haut à droite), ainsi que l'effet du chromatisme sur les performances (en bas, ligne rouge pour le concentrateur classique, ligne bleue en pointillés pour le SLA) [146, 145].

La séparation spectrale permet donc de s'affranchir des effets d'inhomogénéité chromatique, et de réduire les effets d'inhomogénéité d'intensité grâce à l'étalement spectral sur trois cellules PV. Cet avantage supplémentaire devrait permettre de se rapprocher des performances BOL de systèmes à concentration sur des MJ, et potentiellement de réduire

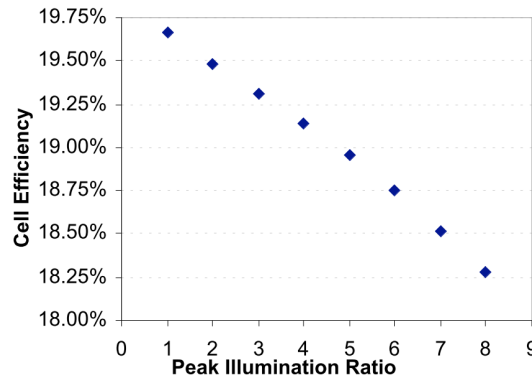


FIGURE 15.10 – Variation d’efficacité selon le rapport du pic d’intensité du pic d’illumination avec la moyenne sur la cellule (cellule Silicium), pour une distribution d’illumination gaussienne, et un taux de concentration moyen de $30\times$ [140].

l’écart voire de les surpasser en fin de mission.

Cet avantage devrait être encore accru si l’on prend en compte les effets des radiations et des contaminants puisqu’ils modifient le spectre incident et finalement participent à l’accroissement de l’inhomogénéité spectrale au niveau des cellules PV.

15.2.3 Choix libre des cellules PV

Nous avons déjà largement évoqué l’avantage de l’indépendance électrique des cellules dans notre configuration de concentrateur. Cependant, cette indépendance physique supprime aussi les conditions de correspondance de matériau à l’interface. Cette nouvelle liberté, associée aux plus faibles contraintes sur la combinaison des E_g des cellules (évoquées en section 9.4), permet alors un choix de cellules beaucoup plus large.

Les avantages principaux en découlant sont donc la possibilité d’utiliser des cellules possédant d’autres caractéristiques que les jonctions des cellules MJ actuelles, ou des cellules incompatibles avec le principe de MJ. Par exemple nous pourrions proposer :

- des cellules plus résistantes aux radiations, cf. graphique 15.7, permettant de réduire la dégradation due à ces radiations, ou d’alléger le panneau en diminuant l’épaisseur de la protection.
- d’autres types de cellules incompatibles avec le principe de MJ, comme des « quantum dot solar cells » [3] (plus résistantes aux radiations, coefficients de température plus bas, efficacité plus grande...), ou alors des cellules à plasmons, des CIGS présentant aussi une résistance beaucoup plus grande aux radiations et un coût inférieur, etc.
- l’utilisation de revêtements anti-reflets adaptés à chaque cellule et donc plus efficaces que ceux développés pour les MJ à cause de la large bande spectrale à couvrir [147]. De même, on pourrait envisager des revêtements spécifiques comme des cellules avec « up and down conversion », aussi difficilement compatibles avec des MJ mais pouvant améliorer significativement les résultats au niveau de cellules SJ [148, 149].

Le temps et les informations nous ont manqué pour explorer ces pistes, dont beaucoup sont d’ailleurs toujours en voie de développement. Cette ouverture vers d’autres types de cellules et d’autres technologies est pourtant un point essentiel, élargissant la liberté dans la conception de ces panneaux solaires selon leurs caractéristiques de mission propres.

15.2.4 Revêtement

Comme discuté en section 8.3, l'option du silicone comme matériau pour la lentille de Fresnel nécessite un revêtement protégeant de l'effet des UV. Cependant, ce revêtement (Figure 8.3) a une dépendance avec la longueur d'onde. Comme pour une couche de contaminant, cette dépendance spectrale ne correspond pas tout à fait aux cellules MJ optimisées pour l'AM0, les rendant plus sensibles aux modifications induites par ce revêtement. La réduction au-dessus de 500 nm rend la seconde jonction limitatrice : il y a plus de pertes pour une TJ ou une mono-jonction GaAs que pour les configurations avec séparation spectrale.

Les résultats précédents (Tables 12.3 et 12.5), dans l'hypothèse de l'utilisation d'un revêtement anti-UV, se trouvent donc réduits. Proportionnellement, les performances du concentrateur avec séparation spectrale sont légèrement moins impactées que celles d'un concentrateur focalisant sur une cellule MJ : on perd de 3.4% à 4% pour les concentrateurs avec séparation spectrale, contre près de 5% pour le système avec MJ. Ceci dépend aussi de la calibration de la MJ au départ : si les jonctions ont le même photocourant initialement, la dégradation sera plus flagrante que si les photocourants sont optimisés pour correspondre seulement après l'ajout du revêtement. Comme toujours, l'avantage réel dépend de la puissance initiale selon la combinaison de cellules choisie. Le choix du revêtement et des cellules modifiera aussi un peu les résultats en fin de vie.

15.3 Conclusions

Les avantages théoriques de la concentration solaire sont évidents, et mènent à une large réduction de la surface des cellules pour la même puissance de sortie (gain de cout), ainsi qu'à une puissance spécifique (W/kg) légèrement plus avantageuse dans le cas de notre concentrateur par rapport à un panneau plan.

Par ailleurs, au-delà d'un concentrateur classique focalisant sur une unique cellule PV, notre concentrateur possède aussi les avantages de la séparation spectrale, que nous venons de détailler : une sensibilité réduite aux modifications des conditions d'entrée, l'absence de dégradation due à une inhomogénéité spectrale au niveau de la cellule, la liberté du choix des cellules et les possibilités d'amélioration de chaque cellule notamment via l'usage de revêtements spécifiques.

Cependant, dans l'état des combinaisons de cellules accessibles pour nos simulations, et compte tenu des pertes optiques inhérentes à l'usage de réseaux de diffraction, la plus faible sensibilité de notre concentrateur ne compense pas toujours la plus basse puissance produite BOL : il ne devient avantageux (en W/m² de lentille) que pour des dégradations marquées et spectralement dépendantes. L'absence de sensibilité à une inhomogénéité spectrale n'a par contre pas été pris en compte dans le modèle des cellules MJ, et pourrait rendre l'avantage à notre concept de concentrateur.

D'autre part, la liberté du choix des cellules est sans doute une voie importante pour ce genre de concentrateurs. La possibilité d'utiliser des technologies nouvelles sur des cellules SJ (revêtements spécifiques, quantum-dots, up/down conversion), ainsi que l'opportunité de coupler différents types de cellules incompatibles avec le principe de cellules MJ monolithiques, pourraient mener à des systèmes plus performants, plus résistants, plus légers, moins coûteux, etc. selon le choix effectué. C'est sans nul doute une voie intéressante pour une alternative aux cellules MJ.

Chapitre 16

Perspectives d'applications terrestres et extraterrestres

Le concept de concentrateur développé tout au long de ce travail ne se limite pas à une unique application, mais est adaptable et potentiellement avantageux dans d'autres situations et configurations. Certaines modifications et possibilités ont été testées pour montrer la versatilité du concept et ouvrir certaines voies d'explorations qui, menées à bien, seront peut-être même plus avantageuses que celle étudiée auparavant. Elles sont introduites dans ce chapitre.

16.1 Réseau à faibles périodes

La première adaptation est l'utilisation d'un réseau de diffraction à très petite période (\sim longueur d'onde de la lumière), évoquée en section 9.1, nécessitant la dissociation du réseau et de la lentille. Une configuration permettant de s'accommoder des grands angles de diffraction dus à la faible période du réseau, est décrite en [Annexe H](#). Cette configuration présente l'avantage de réduire les pertes par diffraction dans les ordres supérieurs, mais nécessite deux étages optiques à déployer (la lentille + un concentrateur secondaire pour la diffraction) rendant le concept a priori trop complexe pour une application spatiale. Néanmoins, d'autres géométries pourraient être proposées à l'avenir, qui peut-être mèneraient à des taux de concentration et une efficacité de diffraction corrects pour l'application voulue.

16.2 Utilisation de 3 cellules SJ ou insertion d'une cellule DJ

Les deux autres principales modifications approchées sont l'usage de plus de deux types de cellules SJ : 3 SJ différentes, ou 1 SJ et une DJ. En effet, une solution pour accroître les performances est d'ajouter aux concepts symétriques précédents une cellule SJ ou de remplacer une cellule SJ par une DJ. Trois configurations ont été explorées, dont les détails sont repris en [Annexe N](#) :

Configuration lamellaire avec une cellule DJ

La configuration lamellaire telle que développée précédemment focalise une gamme spectrale relativement large sur la cellule IR (voir Figure 12.1). Plutôt que de la

convertir avec une unique cellule SJ, il serait plus efficace de la convertir avec une cellule DJ adaptée. Un exemple est décrit en Annexe N.1 (Solution 1). Si les performances suite à nos simulations sont accrues à incidence nulle comme attendu ($\times 106\%$), cette configuration présente néanmoins certains désavantages découlant notamment de la structure monolithique de la cellule DJ : le système est dépendant de l'inhomogénéité spectrale et possède une tolérance au dépointage réduite.

Configurations blazée et lamellaire avec 3 cellules SJ

Pour éviter l'utilisation d'une cellule DJ, on peut aussi choisir de placer deux cellules SJ l'une à côté de l'autre sur la zone devant être couverte par la cellule DJ. Cette zone étant spectralement dispersée, chaque partie est alors plus efficacement convertie par une cellule dédiée. Une combinaison possible est détaillée en Annexe N.1 (Solution 2). Les performances à incidence nulle sont améliorées ($\times 110\%$). Cependant, cette configuration nécessite des cellules collées, ce qui réduit fortement la tolérance au dépointage.

Utilisation de 3 ordres de diffraction spectralement différenciés

D'autres profils de réseaux de diffraction sont bien sûr envisageables, et notamment des profils donnant lieu à trois ordres de diffraction principaux (0 et ± 1) spectralement différenciés. Chaque ordre serait alors collecté par une cellule différente adaptée, à moins d'utiliser une configuration symétrique et collecter sur une cellule DJ les ordres 1 et -1. Cette configuration devrait conserver le même ordre de tolérance au dépointage que la configuration lamellaire, mais dans le cas testé décrit en Annexe N.2, les pertes intrinsèques dues au profil non-idéal de la séparation spectrale ne la rendent pas plus performante que les autres options. D'autres optimisations de profils et de combinaisons de cellules pourraient néanmoins résulter en des performances plus intéressantes.

La tolérance au dépointage constitue la contrainte la plus critique pour le design du concentrateur. La majorité des solutions proposées ci-dessus permettent d'accroître les performances à incidence nulle, mais dégradent obligatoirement la tolérance au dépointage. Cette tolérance est nécessaire principalement pour les applications spatiales, pour lesquelles l'utilisation de plus de deux types de jonctions semble compromise. Cependant, dans le cas d'une contrainte réduite sur la tolérance au dépointage (applications terrestres ou autres), ces solutions pourraient permettre de s'approcher des performances des systèmes à cellules TJ, sans les désavantages de celles-ci.

16.3 Adaptabilité pour le terrestre

Finalement, nous avons envisagé l'adaptation de notre concentrateur avec séparation spectrale au contexte des applications terrestres. Les avantages potentiels que notre concept pourrait y apporter sont décrits ci-dessous.

Variations du spectre solaire

Le spectre solaire perçu sur Terre est très capricieux : il dépend de l'heure dans la journée, des conditions atmosphériques (nuages, humidité, ...), etc. Ces variations sont particulièrement importantes, et peuvent dégrader les performances des cellules PV, principalement si ce sont des MJ. Ce point n'a évidemment pas été pris en compte en section

15.2 étant donné que dans l'espace, le spectre solaire est quasiment constant dans le temps. Ainsi, la possibilité de mise en parallèle des cellules PV plutôt qu'en série (comme c'est le cas pour les MJ), présente un avantage certain pour les applications terrestres : en début et fin de journée par exemple, le concentrateur à séparation spectrale donnera de meilleures performances. Si l'on moyenne ces performances sur une année, incluant les variations saisonnières, on devrait parvenir à un système plus efficace qu'un même concentrateur focalisant sur une MJ. C'est ce qui avait motivé le travail en référence [18] (avec des cellules empilées), et en référence [150] (mais avec un séparateur spectral idéal).

Dans notre cas, le concentrateur blazé par exemple est avantageux entre 5 et 8h du matin, ainsi qu'entre 15 et 18h. Il n'emploie que des cellules SJ, soit dans une version avec 2 SJ (GaAs et InGaAs), soit dans une version plus performante avec 3 SJ (InGaP, GaAs et Si, cf. Annexe N.1). Le choix des cellules à combiner est large. Une moyenne sur l'année pourrait mener à des résultats plus performants pour notre concentrateur en termes de W/m^2 , d'autant plus si les conditions atmosphériques sont incluses dans les simulations, ainsi que les pertes des MJ dues à l'inhomogénéité spatiale et spectrale de la lumière les atteignant. La condition de tolérance à l'angle d'incidence est ici réduite, ce qui permet aussi de resserrer le design et accroître encore un peu nos résultats. L'usage de SJ donne l'occasion d'utiliser des cellules moins onéreuses que les MJ, ainsi qu'une liberté de combinaisons beaucoup plus large, tout comme la possibilité d'améliorer chaque cellule individuellement pour la rendre plus efficace. Par contre, les taux de concentration sont un peu inférieurs à un concentrateur classique, bien que dans le cas terrestre, une circularisation du concentrateur est tout à fait possible, et élève au carré les taux de concentration étudiés précédemment, eux-mêmes accrus déjà par la relaxation de la condition de tolérance à l'angle d'incidence.

La question du taux de concentration pourrait aussi se résoudre avec la combinaison d'un guide d'onde, comme cela a été proposé pour le projet Guide2Dye [151], qui sera présenté au début de la partie suivante (section 17.1). Ce concept permet de guider chaque intervalle spectral focalisé par de nombreuses combinaisons réseau/lentille vers une même cellule PV adaptée. Ce concept n'était pas compatible avec une application spatiale notamment à cause de la masse supplémentaire de ce guide d'onde.

Cette étude pourrait donc tout à fait s'adapter à des concentrateurs terrestres, car les avantages du choix de cellules et de leur indépendance électrique sont tout aussi importants pour les applications terrestres. Bien sûr le taux de concentrateur atteignable est inférieur à celui d'une simple lentille focalisant sur une MJ, mais c'est alors un compromis à faire entre une surface de cellules plus grande, et les avantages de la séparation spectrale : le large choix et le coût plus bas des cellules SJ qu'il est possible de combiner, leur plus faible sensibilité aux variations de spectre sur une année ainsi qu'à l'inhomogénéité spatiale et spectrale de la lumière les atteignant. Ainsi, si la faible sensibilité spectrale de notre concentrateur peut compenser les pertes optiques supplémentaires dues à la séparation spectrale, la production annuelle d'énergie du concentrateur avec séparation spectrale sera supérieure à celle d'un concentrateur classique.

Cette amélioration de sensibilité moyennée sur un certain laps de temps pourrait d'ailleurs aussi être considérée pour des missions spatiales lointaines, ou dans des atmosphères d'autres planètes modifiant significativement le spectre solaire reçu par les cellules

PV. L'effet de ces autres atmosphères comme celle de Mars sur les MJ optimisées pour le spectre AM0 est notamment étudié en références [152] et [153], où l'importance d'un design pour le spectre d'utilisation est mis en évidence. La liberté de combinaison des cellules et leur indépendance donne donc l'avantage à notre concentrateur qui sera plus à même à s'adapter au changement de spectre. La liberté d'adaptation dans ce cas est donc un grand avantage.

Dépassement de la limite d'efficacité maximale des MJ

Dans un autre contexte, les applications solaires avec séparation spectrale pour le terrestre sont souvent proposées pour tenter de dépasser les limites d'efficacité maximale des MJ : la répartition latérale du spectre permet en effet de placer presque autant de cellules PV qu'on le souhaite, sans contraintes entre elles, menant en théorie à une conversion optimale du spectre solaire (moyennant les pertes dues au système de séparation spectrale évidemment). C'est ce but qui a dirigé les travaux notamment des références [29, 154, 155], dont finalement l'élément optique s'approche aussi d'une combinaison d'un réseau et d'une lentille, plus particulièrement pour la référence [155]. Ainsi, exactement comme ils le proposent, il est aussi possible pour notre concentrateur d'être adapté au terrestre, et de viser une efficacité globale supérieure (et un coût moindre) grâce à l'utilisation de cellules SJ. Ceci revient un peu à la solution avec 3 cellules SJ présentée précédemment, mais avec un nombre libre de cellules placées côte à côte. L'avantage du travail pour le terrestre est la qualité du pointage du soleil, qui permet de s'affranchir de la grande contrainte sur la tolérance au dépointage qui nous limitait pour les applications spatiales. Notre modèle étant plus libre pour l'optimisation (avec la possibilité de deux types de réseaux, l'optimisation de la période le long de la lentille permettant de jouer sur la dispersion spectrale dans le plan focal, etc.), il pourrait amener des solutions intéressantes dans ce domaine. C'est donc une autre piste à explorer.

PARTIE IV

Etude expérimentale

Cette quatrième et dernière partie est consacrée aux aspects expérimentaux : en premier lieu pour vérifier la concordance entre nos modèles et les mesures expérimentales grâce aux réalisations d'un projet connexe réalisé au CSL, en second lieu de sorte à tester la faisabilité tout en silicone via des essais en laboratoire à Hololab.

Chapitre 17

Mesures expérimentales et comparaison avec la théorie

En synergie avec ma thèse, j'ai participé à un projet de la région wallonne mené au CSL : le projet Guide2Dye¹ (G2D) [151], programme Erable, plan Marshall2.vert. Ce projet consistait en la proposition et l'étude complète d'un concentrateur solaire terrestre appliqué à des cellules à colorant (DSSC) [156]. Ces cellules ont l'avantage d'être très peu coûteuses, mais ne sont pas encore compatibles avec une structure superposée comme celle des cellules MJ. C'est donc ici qu'intervient l'intérêt de la séparation spectrale : s'il est possible de séparer spatialement et spectralement la lumière incidente, chaque partie du spectre peut être dirigée vers une des cellules DSSC adaptée à ce spectre, pour finalement atteindre une conversion plus efficace qu'avec une seule cellule. Bien sûr, une fois le concept en place, il est adaptable à tout type de cellules PV.

Selon cette idée, un concept de concentrateur a été mis au point, décrit au point suivant. Ce concentrateur utilise une combinaison réseau/lentille pour réaliser la séparation spectrale. J'ai eu la tâche d'optimiser cet élément optique, ce qui a été fait par la méthode développée dans ce travail (configuration blazée à période fixe), appliquée au cas particulier du projet G2D. Les résultats expérimentaux que nous avons obtenus en fin de projet peuvent donc être utilisés pour appuyer le principe et la fiabilité du modèle de notre concentrateur spatial, de même que pour vérifier la corrélation théorie/expérience.

1. Ce projet a mené à un article dans les proceedings d'une conférence internationale, dont je suis co-auteur : P. Blain, C. Michel, L. Clermont, F. Languy, M. Décultot, S. Habraken, C. Lenaerts, K. Fleury-Frenette, D. Vandormael & J. Loicq, *Spectral splitting planar solar concentrator : Design and Experimental testing Preliminary results*, Proceedings of SPIE **9140** (2014).
Un article est par ailleurs en cours de rédaction.

17.1 Résumé du projet Guide2Dye

Le principe suivi pour le projet G2D est repris en Figure 17.1. Il est composé de deux éléments optiques principaux :

1. une combinaison réseau/lentille pour focaliser et étaler spectralement la lumière (élément nous concernant plus particulièrement),
2. un guide d'onde avec des « sillons » réfléchissants, pour réaliser la séparation spectrale et diriger chaque partie du spectre vers les cellules adéquates.

L'idée est donc de focaliser et disperser spectralement la lumière incidente sur les sillons du guide d'onde. Ceux-ci sont réfléchissants et optimisés de sorte à partager la lumière dispersée en deux parties spectralement différenciées. Les rayons réfléchis sont alors dirigés par réflexion totale interne vers les cellules DSSC placées en bout de guide d'onde. Le taux de concentration est donc défini par le rapport entre la surface totale des lentilles et celle des cellules en bout de guide d'onde.

L'utilisation d'un réseau de diffraction blazé suppose deux ordres de diffraction principaux : l'ordre 1, spectralement dispersé, qui est utilisé ici, et l'ordre 0, non-diffracté, contenant principalement l'IR, traversant le guide d'onde sans être collecté. Les cellules DSSC utilisées couvrent le spectre visible. La perte de l'ordre 0 contenant l'IR est donc bénéfique puisqu'elle permet d'éviter l'échauffement inutile des cellules.

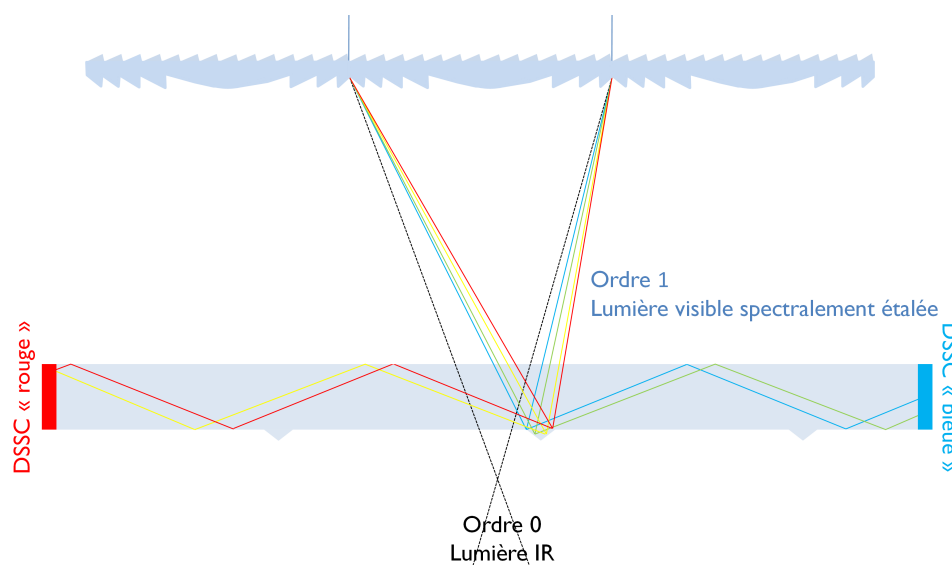


FIGURE 17.1 – Schéma de principe du projet G2D, complètement décrit en référence [151]. Il comprend une combinaison réseau/lentille pour focaliser et étaler spectralement la lumière sur les structures réfléchissantes du guide d'onde situé dessous. Ce guide d'onde dirige alors la lumière jusqu'aux cellules PV adaptées.

Ce concentrateur a été développé pour une application terrestre, les contraintes de design ne sont donc pas les mêmes que pour notre concentrateur spatial. Notamment, le choix du matériau est beaucoup plus libre. Il a ici été choisi d'utiliser une lentille en PMMA (Plexiglas® Solar IM20 from Evonik) réalisée par injection, sur laquelle est « imprimé » un réseau de diffraction, dans une colle NOA76, d'indice de réfraction très proche de celui du

PMMA (voir Annexe [O.1](#)).

Le concentrateur a été optimisé numériquement de la même façon que notre concentrateur spatial, utilisant les méthodes développées précédemment dans cette thèse appliquées aux contraintes particulières du projet G2D :

- adaptation aux spectres spécifiques des cellules DSSC développées à cet effet,
- taux de focalisation déterminé par un compromis entre une dimension suffisamment large des miroirs pour effectuer la séparation spectrale efficacement, et en même temps suffisamment faible pour éviter de trop larges pertes par découplage dans le guide d'onde,
- dispersion spectrale suffisante à l'ordre 1, de sorte à maximiser l'efficacité de séparation spectrale du concentrateur,
- si possible, pas de superposition avec l'ordre 0 afin d'éviter une surchauffe inutile au niveau des cellules PV.

Les paramètres optimaux de l'élément optique sont un $F\#$ de 2, une période de $22\text{ }\mu\text{m}$, et un décentrage de 1 mm .

Après la validation numérique, chaque élément a été réalisé pour assemblage : le moule de la lentille a été réalisé par *diamond turning* chez B-Phot [\[157\]](#), la monture en aluminium, le guide d'onde et les lentilles en PMMA ont été réalisés chez Sirris [\[158\]](#), l'ajout du réseau de diffraction a été réalisé par le laboratoire des matériaux au CSL, le réseau provient de chez Richardson Gratings [\[159\]](#) et les cellules proviennent du Groupe de Recherche en Energie et ENvironnement à partir des MATériaux (GREEnMat) [\[160\]](#) de l'ULg. Ensuite, de façon assez systématique, chaque élément a été caractérisé séparément, puis en combinaison, au CSL. Seul le premier élément optique (réseau/lentille) nous concerne directement. Les résultats de son analyse sont décrits dans les points suivants : d'abord le réseau seul, la lentille, puis la combinaison des deux. Les résultats globaux du concentrateur comprenant le guide d'onde ne sont pas abordés ici, mais sont décrits en référence [\[151\]](#).

17.2 Réseaux de diffraction

Les caractéristiques principales du réseau de diffraction sont ses courbes d'efficacité de diffraction, et sa période. Après réception du réseau provenant de chez Richardson Gratings, ses propriétés diffractives ont donc été mesurées. Les résultats sont présentés dans les points suivants. Le but était double : à la fois connaître ses caractéristiques en vue d'une comparaison avec les simulations, mais aussi éventuellement adapter la lentille dans le cas d'une différence avec les caractéristiques annoncées.

Les caractéristiques constructeur du réseau de diffraction reçu sont reprises en [Annexe P](#). C'est un réseau blazé gravé dans du verre, de $22.22\text{ }\mu\text{m}$ de période et 500 nm de longueur d'onde de blaze.

17.2.1 Vérification de la période du réseau

La période du réseau a été vérifiée grâce à un montage optique simple. Le principe est le suivant :

1. Un laser est placé en incidence perpendiculaire par rapport au réseau de diffraction.

2. La distance séparant les positions des différents ordres est relevée sur un plan focal perpendiculaire à grande distance (> 2 mètres).
3. Cette distance combinée à l'équation des réseaux (eq. (4.4)) permet de déterminer la période du réseau de diffraction. Plusieurs ordres de diffraction sont utilisés pour confirmer la mesure.

Cette expérience a été réalisée 3 fois, avec 3 sources lasers différentes, donnant une période moyenne de $22.24 \mu\text{m}$, ce qui est assez proche de la période annoncée par le constructeur². Cette valeur est sous la tolérance sur la période estimée en section 13.1.1, une adaptation de la forme de la lentille n'est donc pas nécessaire. Nous utiliserons cette valeur moyenne pour nos simulations.

17.2.2 Mesure de l'efficacité de diffraction

Le dispositif optique mis en place pour la mesure des efficacités de diffraction est repris en Figure 17.2. Le principe et la méthodologie sont décrits en Annexe Q.

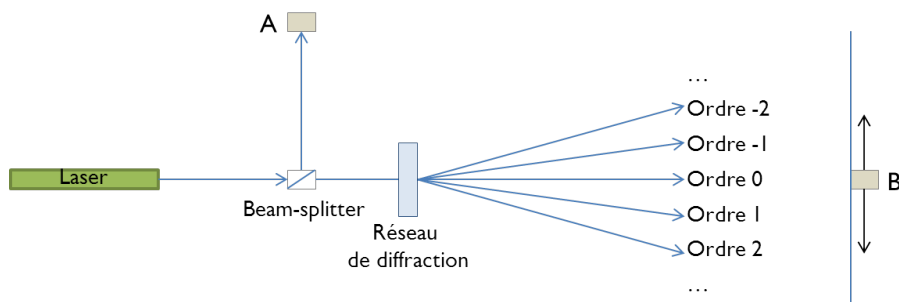


FIGURE 17.2 – Montage optique pour la mesure de l'efficacité du réseau de diffraction. La source est un laser, monitoré en continu par le détecteur A. Le détecteur B se déplace latéralement pour mesurer les différents ordres de diffraction, ainsi que la référence (sans réseau de diffraction) avant et après chaque mesure. Le rapport des mesures avec la référence permet de déterminer l'efficacité de diffraction absolue du réseau dans chaque ordre.

Les résultats ont mis en évidence la non-idéalité du profil du réseau en verre. En effet, bien qu'un maximum soit observé autour de 500 nm de longueur d'onde, l'efficacité à cette longueur d'onde est loin des $\sim 90\%$ attendus (environ 20% inférieure). D'ailleurs, un réseau blazé idéal avec la période et l'angle de blaze annoncés devrait avoir une longueur d'onde de blaze autour de 450 nm seulement... Cet écart est illustré sur la Figure 17.3. Cette différence suggère un profil non-idéal : des mesures directes du profil ont donc été réalisées. Elles sont présentées dans le point suivant.

Par la suite, des mesures d'efficacité de diffraction ont été réalisées sur toutes les répliques du réseau. Les objectifs étant, en collaboration avec le laboratoire matériau du CSL, d'optimiser le processus de fabrication des réseaux en NOA76 et de vérifier la qualité de chaque réplique.

2. Chaque mesure en tant que telle a seulement environ $\pm 0.1 \mu\text{m}$ de précision (erreur de 0.5 mm sur la distance entre les ordres et 2 mm sur la distance entre le mur et le réseau). Une erreur de $0.2 \mu\text{m}$ sur la valeur de la période peut donner lieu à un décalage dans le plan focal d'environ 0.03 mm entre les ordres 0 et 1.

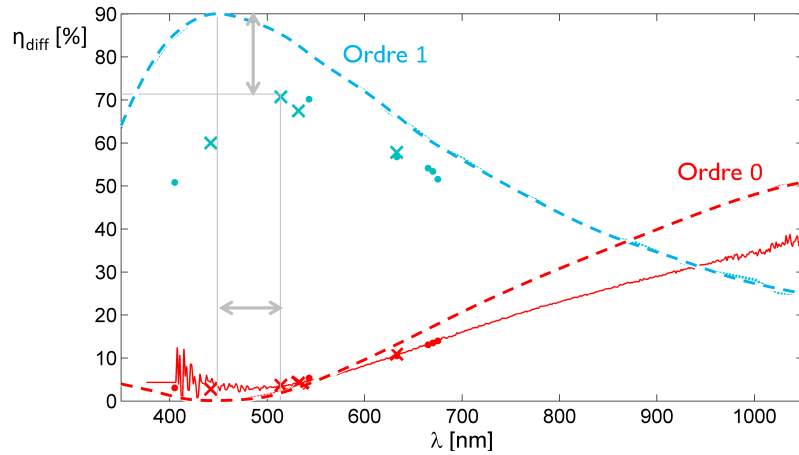


FIGURE 17.3 – Points de mesure de l’efficacité de diffraction du réseau en verre (croix et points), et courbes théoriques selon les données du constructeur (lignes pointillées). On observe un large écart entre les deux (cf. flèches grises), suggérant un profil non-idéal du réseau. La courbe rouge bruitée correspond à une mesure de l’ordre 0 en lumière blanche, corroborant les mesures ponctuelles au laser.

17.2.3 Images et profils du réseau

Images SEM Les images SEM du réseau original sont reprises en Figure 17.4. On observe une discontinuité à la base des dents, ainsi qu’un arrondi des dents, sans doute dûs à l’outil utilisé pour la fabrication. Une mesure précise de profil a donc été réalisée au microscope confocal (chez Sirris).

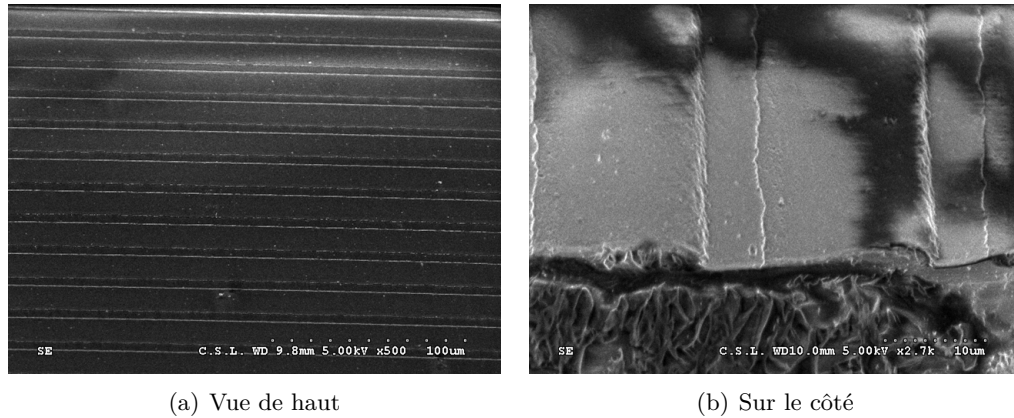


FIGURE 17.4 – Image SEM du réseau de diffraction original (en verre).

Images au microscope confocal Les mesures de profilométrie du réseau ont été réalisées au microscope confocal [161]³. Des exemples de profils mesurés sont repris en Figure 17.5, montrant bien la déformation à l'origine de la discontinuité dans les images SEM. Ce profil est assez éloigné d'un profil parfaitement blazé comme attendu. Cette différence de profil explique l'écart de la courbe d'efficacité de diffraction de la Figure 17.3. Une moyenne des profils sera donc utilisée pour les simulations dans PC-Grate®, de sorte à modéliser au mieux les résultats expérimentaux.

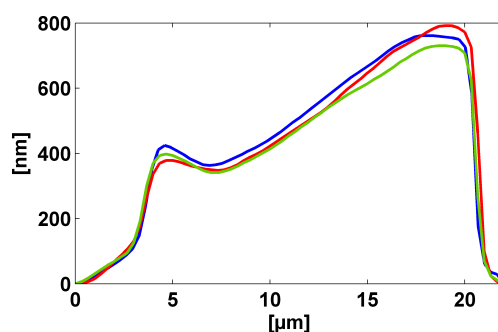


FIGURE 17.5 – Trois mesures du profil du réseau de diffraction blazé initial en différents points, réalisées grâce à un microscope confocal. Les différentes mesures ont des hauteurs très proches, à ± 30 nm, la période est quant à elle quasiment identique à la précision de mesure près³. Le réseau est donc bien homogène.

Les performances moyennes de ce réseau impacteront directement le résultat final, illustrant bien l'importance de la qualité du réseau choisi.

17.2.4 Comparaison des résultats avec la théorie

Nous faisons l'hypothèse que le processus de réplcation, une fois optimisé, est suffisamment performant pour supposer que le profil des réseaux répliqués est très proche de celui du réseau initial en verre. Le profil moyen des mesures au confocal est donc utilisé pour toutes les simulations théoriques, que ce soit pour le réseau en verre ou une de ses répliques. Par la suite, nous poserons donc aussi l'hypothèse d'une réplcation parfaite du réseau sur la face plane de la lentille.

La validité de cette hypothèse est d'ailleurs confirmée par la proximité des simulations PC-Grate® sur base de ce profil unique, et des mesures expérimentales des répliques. Deux résultats sont présentés en Figure 17.6 : on observe que les résultats théoriques et expérimentaux sont en conformité, malgré l'hypothèse de réplcation parfaite. C'est d'ailleurs cette hypothèse qui induit la légère surestimation de l'ordre 1 et sous-estimation de l'ordre 0. Ceci peut donc être à l'origine d'une erreur jusqu'à 10% sur la répartition d'énergie entre les ordres 0 et 1 lors de la comparaison du système complet avec nos simulations.

3. Résolution verticale de 1 nm, échantillonnage spatial de $0.09 \mu\text{m}$ [161].

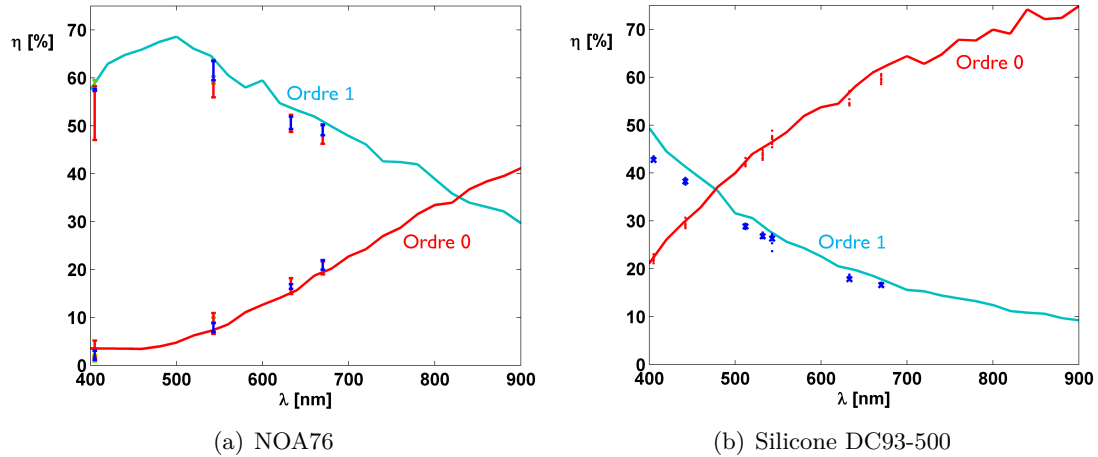


FIGURE 17.6 – Comparaison des efficacités mesurées et simulées (PC-Grate[®]) avec la colle NOA76 et le silicone DC93-500. Les simulations correspondent à un réseau possédant le profil esquissé en Figure 17.5, mais avec l'indice de réfraction du matériau de la réplique : c'est donc en théorie ce que l'on devrait avoir si la réplique est parfaite. Les mesures sont proches des simulations, illustrant la fiabilité du processus de réplique mis en place. Le décalage en longueurs d'onde entre les résultats du NOA76 et du silicone provient de la différence d'indice de réfraction. Quant au léger décalage de la courbe de l'ordre 0 dans le cas du NOA76, il peut provenir d'une erreur sur la hauteur du profil : un décalage de 20 nm peut être expliqué par une erreur de 40 nm sur la hauteur (provenant d'erreurs de mesure et d'un éventuel rétreint). La surestimation de l'ordre 1 n'est pas simplement due à une erreur sur la hauteur, elle provient d'une approximation sur le profil, ce qui est plus difficile à déterminer.

17.3 Lentille

La lentille en PMMA a été réalisée par injection chez Sirris, sur base d'un moule dont le profil a été optimisé par les méthodes présentées précédemment (réseau blazé à période fixe), et réalisé par la société B-Phot. Il a été choisi de ne pas travailler avec une lentille de Fresnel, la question du poids n'étant pas importante pour une application terrestre et la « fresnelisation » entraînant une complexification et des pertes optiques supplémentaires. Le réseau de diffraction décrit dans la section précédente sera « imprimé » sur la face avant de la lentille dans de la colle NOA76. Une photographie de l'élément optique final est reprise en Figure 17.7.



FIGURE 17.7 – Combinaison optique réseau/lentille réalisée durant le projet G2D. La lentille est en PMMA, le réseau de diffraction en NOA76 directement « imprimé » dessus.

Détermination du profil

Nous avons déjà abordé le détail du profil du réseau de diffraction. Mais la question de la forme de la lentille est aussi très importante. Lors de la commande, l'erreur sur le moule devait être inférieure à une dizaine de microns (moins d'1% de la courbure globale, ce qui est dans nos tolérances). Cependant la réplication a lieu par injection, et des relaxations de contraintes ou autres ont pu légèrement modifier la forme initiale. L'étude de la forme a fait l'objet d'une mesure au DekTak, au microscope optique et finalement d'une mesure à l'aide d'une lumière collimatée projetant le profil de la lentille sur un CCD pour enregistrement. Ces résultats (exemple en Figure 17.8), nous ont permis d'établir les deux points suivants :

1. Après correction de la rotation, les profils mesuré et théorique se superposent quasiment parfaitement. Nous ferons donc l'hypothèse dans les simulations que la forme est idéale.
2. La face avant de la lentille est inclinée par rapport à la forme théorique. L'inclinaison est d'environ 0.6° par rapport à l'horizontale théorique, et n'est pas parfaitement plane. Ceci joue un rôle non négligeable dans les simulations, et est la cause d'erreurs d'alignement de la lentille (initialement alignée sur la réflexion au niveau de sa face avant).

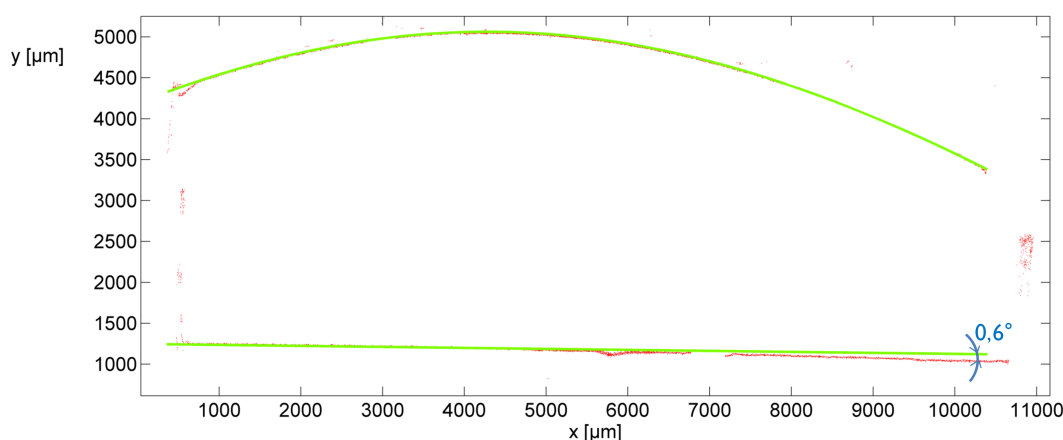


FIGURE 17.8 – Mesure du profil de la lentille (points rouges) et courbe idéale (ligne verte). On observe un angle d'inclinaison de la face avant d'environ 0.6° . Pour le reste, le profil observé est très proche de celui du design.

Indice de réfraction

L'indice de réfraction du PMMA utilisé a été mesuré au réfractomètre au CSL. Son équation est décrite dans l'Annexe 0.2.

17.4 Caractérisation de la combinaison réseau/lentille

Les étapes de caractérisation de ce concentrateur impliquent principalement l'étude du plan focal de l'élément optique : premièrement celui de la lentille seule, ensuite combinée avec le réseau, et finalement intégrant le guide d'onde de sorte à déterminer ce qui parvient à chaque extrémité. Cette dernière étape ne nous concerne cependant pas, nous nous limiterons donc ici aux deux premières.

L'objectif de ces mesures est évidemment de vérifier la corrélation avec la théorie, de sorte à nous rendre confiants dans nos résultats, mêmes pour des configurations légèrement différentes.

17.4.1 Dispositif pour la caractérisation du plan focal

Pour caractériser le système (lentille seule ou lentille/réseau) et avoir une comparaison précise avec la théorie, nous avons utilisé le simulateur solaire présent au CSL [162, 163]. Ce simulateur solaire illumine alors la lentille ou l'élément optique réseau/lentille, dans le plan focal duquel se déplace une fibre optique liée à un spectromètre. Différents plans parallèles à la lentille peuvent être mesurés. Le montage complet est décrit en Annexe R et dans la référence [151], schématisé dans la Figure 17.9.

Ce système nous permet donc d'obtenir des données spectrales et spatiales de plusieurs plans parallèles à la lentille, et donc d'imager son plan focal à plusieurs distances de la lentille. Pour tenter de s'affranchir de la variation de la source, une mesure de la référence est faite avant chaque mesure. Les résultats sont donc relatifs à la source.

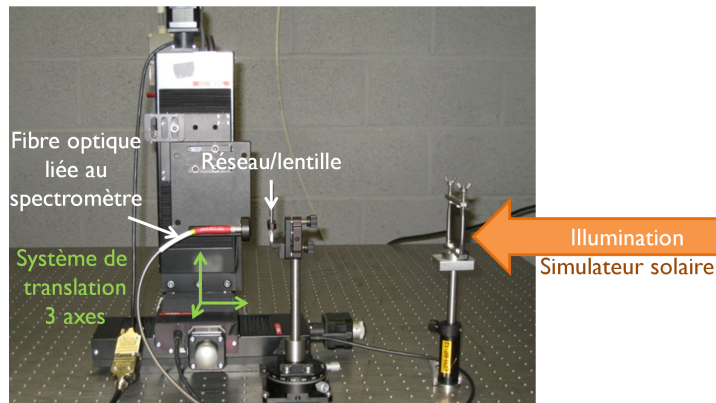


FIGURE 17.9 – Dispositif de mesure : l'élément optique analysé est placé sur une monture fixe, exposée à la sortie d'un simulateur solaire. Une fibre optique liée à un spectromètre est fixée sur un système de translation 3 axes, permettant de cartographier spatialement et spectralement différents plans focaux.

17.4.2 Adaptation des simulations pour correspondre aux conditions de la mesure expérimentale

Le système de mesure mis en place au laboratoire ne correspond pas tout à fait à une situation réelle au niveau de la source de lumière, et les techniques de mesure imposent des hypothèses différentes de celles faites lors de nos simulations. Il a donc fallu prendre en compte tous ces éléments de sorte à adapter les codes de simulations numériques et

les faire concorder avec les conditions de notre montage. Les principales modifications et contraintes sont les suivantes :

1. La fibre étant circulaire, elle moyenne la lumière reçue dans un cercle de $25\text{ }\mu\text{m}$ autour du point de mesure.
2. La table et la lentille peuvent être inclinées par rapport au faisceau incident. On a mesuré un alignement de la lentille à $\pm 1^\circ$ (dû à l'inclinaison et courbure de la face théoriquement plane de la lentille), et un angle de 0.33° entre l'axe de la table et celui de la lumière incidente.
3. La divergence de la source n'est pas idéale (voir Figure R.2). Les rayons se voient donc accorder un poids spécifique à chaque angle et chaque position.
4. La fibre optique et le spectromètre ont des réponses angulaires et spectrales propres (voir Figure R.5). L'alignement de la fibre est donc important. La fibre a ici été alignée sur sa réponse maximale, c.-à-d. à 4 ou -4° (et non 0° comme on l'aurait supposé si la réponse avait été gaussienne).
5. Le spectre réel de la source diffère de celui du soleil (voir Figure R.3).

Les étapes pour l'intégration des erreurs d'alignement sont reprises en [Annexe S](#).

17.4.3 Comparaison théorie/expérimental

Lentille seule

La caractérisation de la lentille seule a montré une bonne corrélation avec les résultats attendus. Ces résultats sont décrits en référence [\[151\]](#).

Résultat qualitatif de la combinaison réseau/lentille

Avant même de tester en laboratoire l'élément optique réalisé, il est déjà possible de se convaincre de son bon fonctionnement en tant que concentrateur avec séparation spectrale, en le plaçant simplement sous les rayons du soleil. La Figure 17.10 reprend une photographie du plan focal de cette combinaison réseau/lentille sous le soleil. La principale conclusion qui s'impose est la suivante : les deux principaux ordres de diffraction (0 et 1) sont bien visibles et spatialement séparés comme attendu, la lumière visible étant dispersée dans l'ordre 1 et la majorité de la lumière proche IR se retrouvant dans l'ordre 0. De prime abord, ce résultat conforte nos simulations et est encourageant quant aux possibilités de réalisation de cet élément optique.

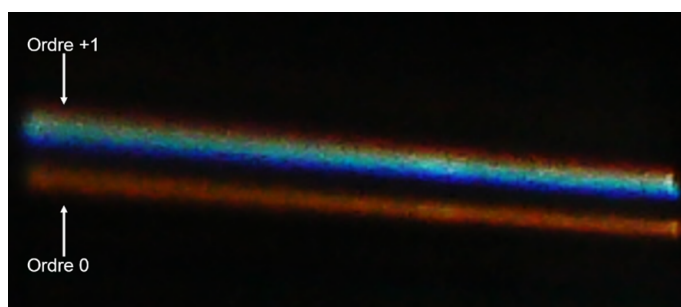


FIGURE 17.10 – Photographie du plan focal d'une lentille+réseau réalisée dans le cadre du projet G2D. Les séparations spatiale et spectrale de la lumière entre les ordres de diffraction 0 et 1 sont nettes.

Analyse quantitative de la combinaison réseau/lentille

L'étape suivante est donc la caractérisation quantitative de la combinaison réseau/lentille. Au niveau de la simulation pour la comparaison, nous intégrons :

- les courbes d'efficacité de diffraction tirées des mesures expérimentales (les courbes réalisées via PC-Grate[®] avec le profil du réseau en verre mesuré au confocal, cf. graphe 17.6),
- le profil idéal de la lentille, mais incluant l'inclinaison approximative de 0.6° de sa face avant,
- les considérations sur le dispositif de mesures détaillées au point 17.4.2, soit la divergence et le spectre de la source, les réponses spectrales et caractéristiques du système de mesure (fibre optique + spectromètre), ainsi que les erreurs d'alignement,
- les indices de réfraction mesurés au CSL (Annexe O).

Le plan focal a été identifié comme celui présentant le maximum d'intensité dans l'ordre 1, mais à 0.5 mm près par rapport à la lentille. Pour réduire notamment l'incertitude sur la distance focale et les angles d'incidence, deux plans focaux ont été étudiés, à 1 mm de distance⁴.

Un des résultats de la comparaison est repris en Figure 17.11, pour un angle de fibre de -4° , ce qui correspond au maximum de sa réponse et donc à l'alignement effectué pour les mesures, une incidence de 0.32° , ce qui est bien entre -1 et 1° de la précision d'alignement (environ les 0.6° d'inclinaison de la face avant moins l'inclinaison de 0.33° de la table), et des plans focaux à -0.32 et -1.32 mm, dans la marge d'erreur de ± 0.5 mm sur la position du « 0 », mais avec exactement 1 mm entre les deux plans de mesure.

Les principales conclusions sur la comparaison des résultats théoriques et expérimentaux sont les suivantes :

1. Les positions relatives des ordres 1 et 0, ainsi que celles des longueurs d'onde entre elles, sont identiques, aux erreurs de période et de la résolution du moteur de translation près.
2. Les densités de puissances sont proches et du même ordre de grandeurs. La différence vient presque assurément de l'inexactitude des efficacités de diffraction utilisées (cf. Fig. 17.6) à cause de l'hypothèse de réplique parfaite, et d'une éventuelle variation de la source (moins de 2%, voir Annexe R).
3. Les formes des taches focales sont proches, même sur deux plans focaux éloignés d'1 mm. Cette forme est influencée par celle des réponses angulaires de la fibre optique et du spectromètre (Fig. R.5), ainsi que par la divergence de la source et la forme exacte de la lentille et de sa face avant.

Etant donné les incertitudes sur les réponses angulaires, la forme exacte des lentilles, les efficacités de diffraction réelles, ainsi que sur le positionnement, les résultats sont assez proches pour supposer une bonne simulation du système.

4. Les moteurs de translation possèdent une résolution d'environ $0.1 \mu\text{m}$, mais ont une précision de 0.09% sur un déplacement absolu. Le second plan focal est donc défini à $\pm 0.9 \mu\text{m}$ près.

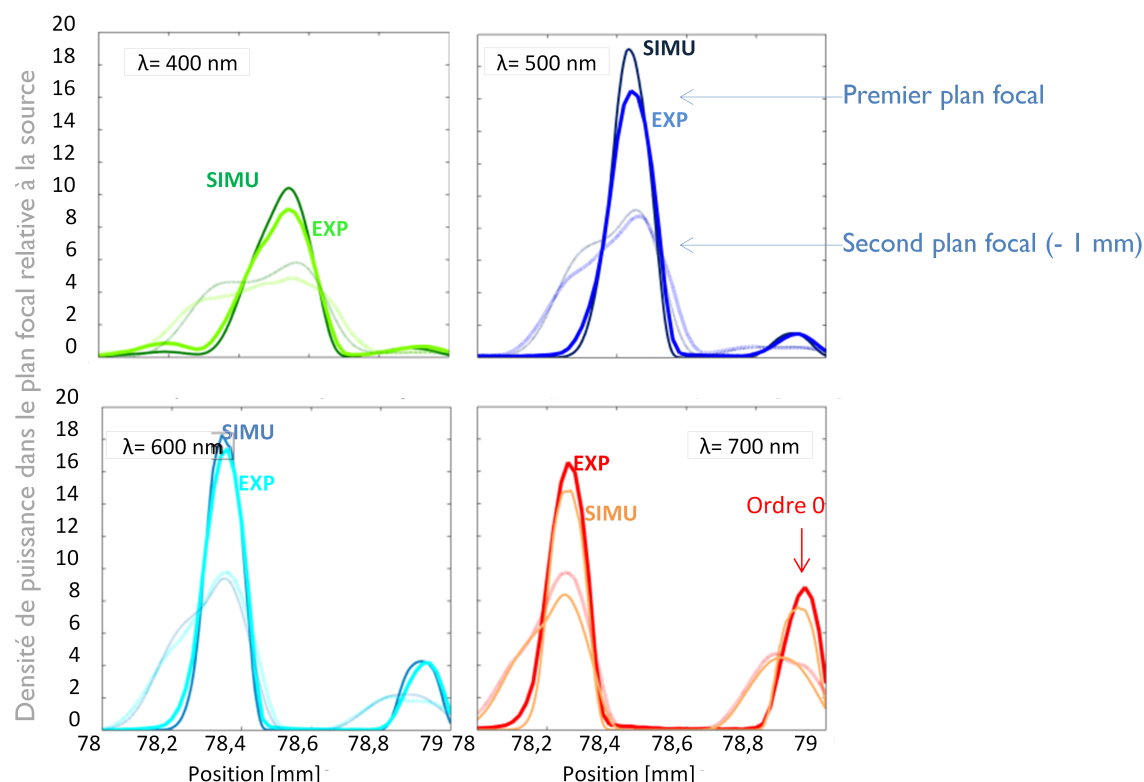


FIGURE 17.11 – Comparaison de la simulation et des résultats expérimentaux : densité de puissance (relative à la source) reçue selon la position dans un plan parallèle à la lentille pour quatre longueurs d’onde ($\lambda = 400 - 500 - 600 - 700\text{nm}$) et deux distances par rapport à la lentille (lignes pleines : dans le plan focal théorique, lignes pointillées : 1 mm sous le plan focal théorique). Les lignes épaisses sont les mesures expérimentales, les lignes fines sont les simulations.

Une seconde mesure a été réalisée, cette fois-ci en lumière blanche (source Ocean optics fibrée, collimatée avec un miroir parabolique), avec une plus grande précision sur les positions absolues, mais plus d’inconnues sur la source (divergence, densité optiques, ...). Pour cette raison, ce n’est pas la forme des spots qui est ici importante, mais simplement leurs positions relativement au bord de la lentille. Cette fois, c’est un simple CCD ([Annexe R](#)) qui image le plan focal (à 20 mm de la lentille, pour la mesure comme pour la simulation). Les résultats sont repris en Figure 17.12 : les taches focales mesurées et simulées ont des positions très proches par rapport au bord de la lentille, ce qui nous conforte dans la précision des résultats précédents.

Par ailleurs, puisqu’ici il n’y a pas de réponse angulaire forte du système de mesure, on observe effectivement la taille des taches focales que l’on peut obtenir et la distance entre les ordres (toutes longueurs d’onde comprises). Tous ces éléments sont vérifiés par la simulation dans les limites des incertitudes expérimentales.

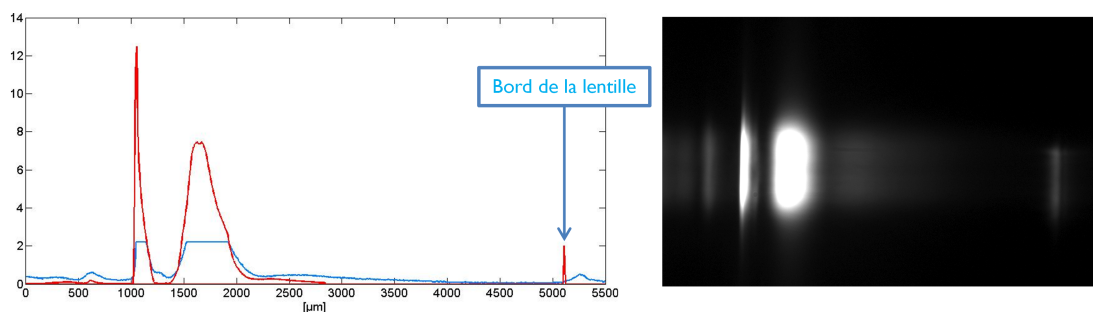


FIGURE 17.12 – Exemple d’une mesure (courbe bleue) faite avec la source blanche, ainsi que la simulation (courbe rouge). Les mesures sont saturées expliquant l’étêtement de celles-ci. L’utilisation d’une densité aurait permis d’éviter la saturation, mais aurait réduit la visibilité des bords des taches focales, or l’important était ici de montrer le bon positionnement de ces taches par rapport au bord de la lentille, d’où ce choix. Les résultats de la simulation respectent la position des spots par rapport au bord de la lentille et la distance entre eux mesurées expérimentalement, nous confortant dans la cohérence de nos simulations. Notons que sur l’image de droite, la source a été limitée à une petite zone de la lentille, ce qui explique les lignes incomplètes dans le sens de la longueur de la lentille.

17.5 Conclusions

Bien que nous n’ayons pas eu l’occasion d’étudier des lentilles avec le design exact de notre concentrateur spatial et totalement réalisées en silicone, nous avons profité du projet G2D pour réaliser une combinaison réseau/lentille sur base de notre modèle. Grâce à ce projet, il a donc été possible de tester le concept de concentrateur proposé du point de vue optique :

1. Une lentille a été réalisée suivant la méthode de design pour un réseau blazé à période fixe.
2. Un réseau de diffraction blazé a été étudié et répliqué sur les lentilles.
3. La combinaison lentille/réseau a pu être testée expérimentalement, donnant des résultats de focalisation et séparation spectrale dans le plan focal.
4. Les résultats expérimentaux ont pu être comparés aux simulations numériques, avec des résultats satisfaisants à la fois au niveau de l’efficacité optique globale, la dimension des taches focales et la distance entre elles.
5. Malgré les erreurs que tout processus de fabrication et réplique entraîne, les résultats théoriques et expérimentaux concordent, même si le modèle théorique fait l’hypothèse de formes idéalement répliquées au niveau du réseau et de la lentille.

Ceci nous conforte donc dans la précision des simulations et le réalisme des autres configurations proposées dans cette thèse.

Chapitre 18

Réseau/lentille de Fresnel en silicone : faisabilité

Pour répondre aux questions de faisabilité, un test en laboratoire a été réalisé. Le but est simplement de réaliser une combinaison réseau/lentille de Fresnel complètement en silicone, avec une épaisseur de l'ordre de 400 μm (cf. hypothèse du bilan de masse). Pour ce faire, des tests ont été réalisés dans les laboratoires d'Hololab (ULg).

Le but n'est en aucun cas de réaliser une combinaison réseau/lentille optimale, à tester ensuite optiquement et mécaniquement (ce qui aurait été intéressant si le temps l'avait permis). L'objectif ici est simplement d'établir la première étape, c'est-à-dire d'objectiver la faisabilité d'une combinaison réseau/lentille de Fresnel dans le même matériau (du silicone), avec une épaisseur totale de moins de 400 μm et qui soit étirable et manipulable. Les étapes de fabrication et l'élément optique final sont décrits dans ce chapitre.

18.1 Matériau : Silicone Sylgard 184

Nous avons utilisé un silicone courant : du Sylgard 184. Ce silicone provient de la firme Dow Corning comme le silicone DC93-500, et possède des propriétés suffisamment proches pour que l'on puisse supposer que les essais réalisés ici seront reproductibles avec le silicone spatialisé. A titre d'information, ses caractéristiques sont reprises en [Annexe T](#).

Le processus de réplique utilisé pour toute réplique en silicone (négatif du moule de la lentille ou l'élément optique lui-même), comprend les étapes suivantes :

1. La base et l'agent de réticulation sont mélangés avec un rapport de 10 pour 1 respectivement.
2. Le mélange subit un premier dégazage¹ de sorte à enlever un maximum de l'air contenu dans le mélange.
3. Le mélange est versé dans le moule et subit un second dégazage pour ôter un maximum des bulles d'air qui seraient apparues.
4. Le tout est chauffé à une température constante de 75°C pendant environ 1h30. La température choisie détermine les propriétés mécaniques du silicone une fois démoulé

1. Le dégazage est effectué par une pompe à vide mécanique, modèle VE-135D, couplée à une cloche en verre.

[164]. Les différences ne sont cependant pas critiques dans notre cas. Un four² étant disponible à une température constante de 75°C, c'est cette température qui a été choisie. Par ailleurs, pour les répliques, le moule de la lentille est en PMMA : la température ne devait donc pas dépasser celle de transition vitreuse du matériau du moule, dont la limite donnée dans la fiche technique est à 80°C [165]. Notons que le four possède une soufflerie interne : l'échantillon doit donc être protégé pendant la chauffe de sorte à éviter l'apparition de « vagues » en surface.

5. La réplique en silicone solidifié peut finalement être démoulée.

18.2 Approche méthodologique

Nous avons procédé en plusieurs étapes pour parvenir à réaliser les éléments réseau/-lentille :

1. **Films minces** Des fins films de silicone ont été réalisés pour se familiariser avec le matériel et le matériau.
2. **Réseau de diffraction** Nous avons alors réalisé des réseaux de diffraction sur un fin film de silicone, prélude à leur réalisation sur une lentille de Fresnel : cette étape ne pose pas de soucis, elle est courante et a déjà été validée au CSL lors du projet G2D. Les mesures d'efficacité de diffraction sont proches de celles faites durant G2D, et très proches des simulations.
3. **Lentille de Fresnel** Une lentille de Fresnel cylindrique en PMMA de chez Edmund Optics® [165] est utilisée ici pour exemple. Elle n'a pas été optimisée pour être combinée avec un réseau de diffraction, mais suffit pour tester la faisabilité d'un tel élément optique. Pour en faire la réplique, deux étapes sont nécessaires : dans un premier temps, on réalise son négatif en silicone, étape relativement facile dans la mesure où les deux ne collent pas. Ensuite, on réalise une réplique en silicone sur base du négatif que l'on vient d'obtenir. Bien qu'un peu difficile à décoller aux bords, un coffrage amovible sur le pourtour permet de repérer l'interface entre les deux éléments avant de les séparer et facilite le démoulage. Les tests avec métallisation pour faciliter davantage le démoulage n'ont pas été concluants dans le sens où, malgré une faible accroche et donc un démoulage plus facile, l'aluminium déposé se répartit ensuite non-uniformément entre le négatif et la réplique qu'on a décollée. De plus, lors du dégazage nécessaire pour retirer les bulles d'air du silicone coulé sur le négatif, certaines bulles emprisonnées sous la couche métallique remontent en surface, laissant de fortes irrégularités dans le moule et la réplique.

2. Etuve BINDER à convection forcée, de la série FP.

4. **Réseau/lentille** L'élément optique complet est obtenu en 4 étapes principales, décrites en Figure 18.1 :

- (a) Le moule en PMMA de la lentille est répliqué en silicone : nous obtenons son négatif.
- (b) Ce négatif, une fois refroidi et solidifié, servira de moule pour la lentille finale.
- (c) Après la mise en place d'un coffrage autour du moule en silicone solidifié, celui-ci est alors rempli de silicone. Le réseau de diffraction en verre est ensuite déposé par-dessus, de sorte à imprimer le réseau sur la face avant de la lentille. Des lamelles en silicone d'environ $350\text{ }\mu\text{m}$ sont placées de part et d'autre du moule, de sorte à ce que le réseau repose dessus, définissant l'épaisseur de notre élément optique (moins l'écrasement du silicone sous le poids du réseau en verre). Ces lamelles doivent impérativement être en silicone de sorte qu'au démoulage, des lames trop rigides ou non-adhésives ne causent une fragilisation et finalement la déchirure de la lentille. Elles se fondent alors dans la lentille, et ne sont plus visibles après démoulage. Notons que le négatif de la lentille n'est pas rigide : pour avoir une surface bien plane (éviter les bulles d'air emprisonnées dessous, etc.), l'interface entre le fond du moule et le substrat plan de verre est optimisée par une fine couche de silicone, évitant ces désagréments.
- (d) Une fois solidifié après passage au four, l'élément optique peut être démoulé.



FIGURE 18.1 – Principe du processus de réplcation. Le changement de couleur du silicone indique son état visqueux (bleu clair) et solidifié après passage au four (bleu foncé).

18.3 Résultats

Une photographie de l'élément optique est reprise en Figure 18.2 où l'on discerne bien la lentille et l'effet de diffraction de la lumière du néon passant au travers.

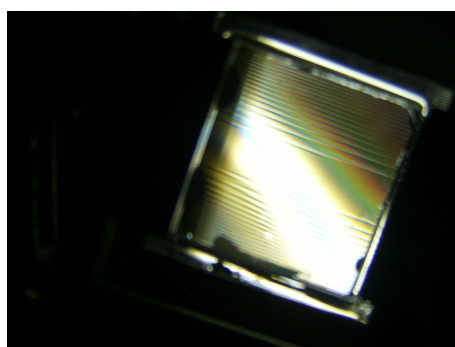


FIGURE 18.2 – Diffraction de la lumière d'un néon au travers de la combinaison réseau/lentille.

18.3.1 Images au microscope

En Figures 18.3(a) et 18.3(b), on peut voir respectivement le réseau de $\sim 22 \mu\text{m}$ de période sur l'avant de l'élément optique réalisé, et l'ensemble de la lentille de Fresnel (une dent) et du réseau de diffraction. La dent de la lentille fait environ $230 \mu\text{m}$ d'épaisseur, l'épaisseur « interne » est donc ici inférieure à cette valeur. Cependant, en moyenne dans les autres lentilles, on se situe à une épaisseur entre 200 et $350 \mu\text{m}$. La lentille et le réseau ont donc été répliqués avec succès en silicone. L'élément obtenu a une dimension d'environ $5 \times 5 \text{ cm}^2$, et se maintient parfaitement seul. De même, la manipulation, légères torsions et étirements jusqu'à 105% ne semblent pas dégrader l'élément optique.

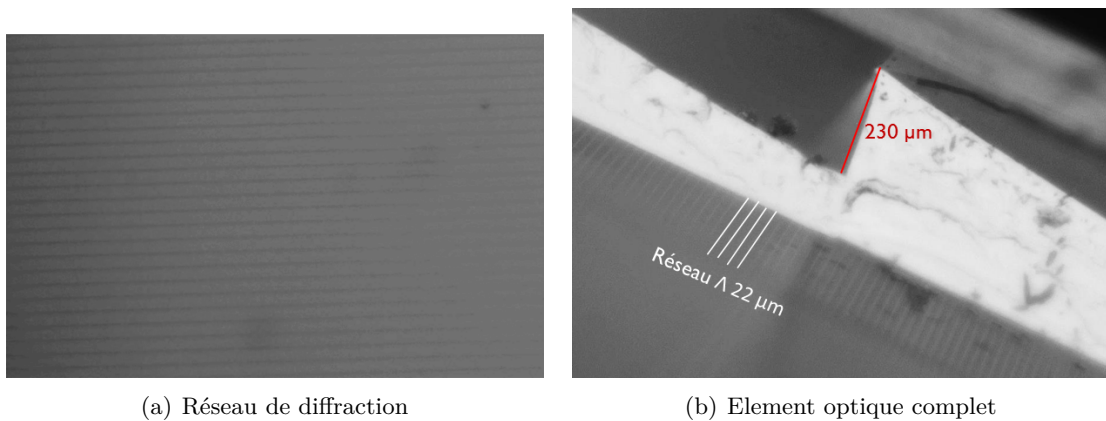


FIGURE 18.3 – Images au microscope $10\times$ (a) de la face du réseau de diffraction, et (b) de l'élément optique complet (une dent de la lentille réfractive et le réseau de diffraction sur la face opposée).

18.3.2 Images du plan focal

Pour voir l'uniformité et la qualité de réalisation, des images du plan focal ont été prises. Dans un premier temps, un faisceau laser est utilisé (élargi et collimaté) pour visualiser les ordres de diffraction en théorie focalisés dans le plan focal : à la distance focale de la lentille, les ordres de diffraction sont bel et bien observables et dissociés, ce sont les Figures 18.4 et 18.5.

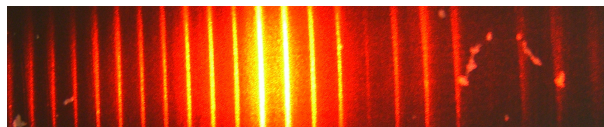


FIGURE 18.4 – Image du plan focal après une source laser collimatée. Les deux lignes les plus intenses sont de gauche à droite l'ordre 0 et l'ordre 1. Les autres ordres bien que visibles, ne possèdent des efficacités que de moins de quelques pourcents.

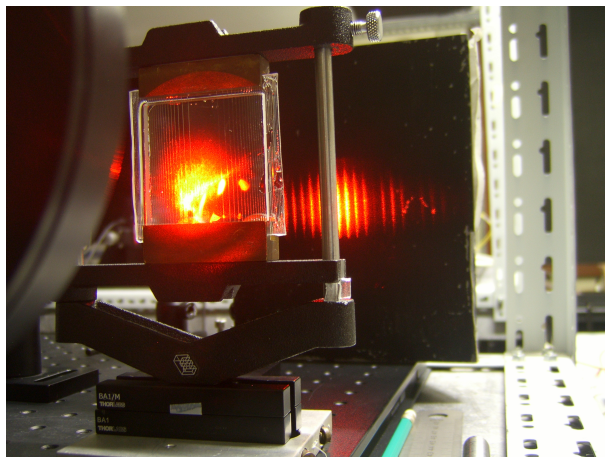


FIGURE 18.5 – Image du plan focal après une source laser collimatée, avec la lentille/réseau en avant-plan.

Ensuite, sous le soleil du soir, des images ont aussi été prises de sorte à visualiser la séparation spatiale, mais aussi spectrale de l'élément optique. Les images sont reprises en Figure 18.6 : on observe bien les deux ordres de diffraction principaux, l'ordre 0 un peu orangé, et l'ordre 1 avec le visible dispersé.

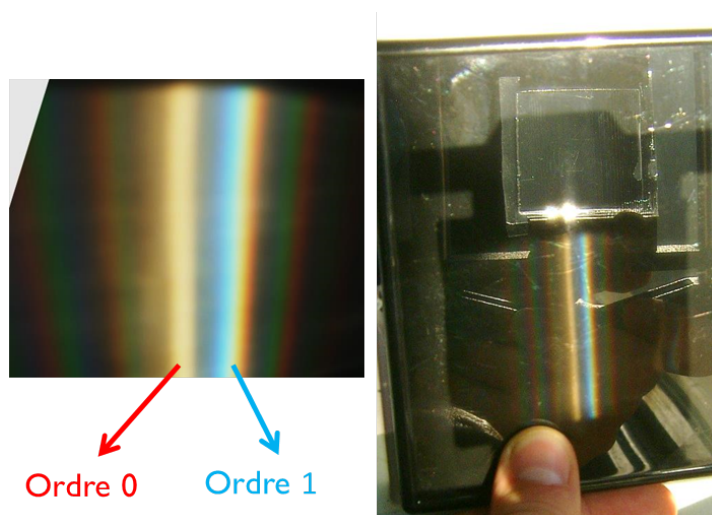


FIGURE 18.6 – Image du plan focal sous le soleil, avec la lentille/réseau réalisée à Hololab : on observe bien l'ordre 0 qui est uniforme et « orangé », ainsi que l'ordre 1 à sa droite qui est dispersé entre le rouge et le bleu. Notons l'uniformité le long de l'axe cylindrique. Dans le reflet de la figure droite, on voit la lentille/réseau exposée au soleil.

18.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons répondu à la question : est-ce physiquement réalisable ? C'est en effet un point qui peut poser question étant donné la faible épaisseur théorique de la lentille, et la nature du silicone. Bien que le silicone utilisé ici ne soit pas le DC93-500, mais un autre plus classique de Dow Corning, il a été montré qu'il est possible de réaliser expérimentalement une combinaison réseau de diffraction/lentille tout en silicone. Bien que la précision de réplique n'ait pas été étudiée, les résultats montrent un élément optique qui résiste aux manipulations, qui est uniforme à l'oeil mais aussi dans les lignes de diffraction qu'il focalise, et surtout qui sépare spatialement et spectralement la lumière, comme attendu.

L'étape suivante serait de vérifier la qualité de réplique du réseau et de la lentille par profilométrie, de vérifier optiquement les résultats par rapport aux simulations, d'aborder la question des effets des déformations (étirement, torsion) sur les résultats dans le plan focal (à corréliser avec les études de tolérancement), et l'intégration d'un procédé automatisé, éventuellement dans un contexte plus industriel.

PARTIE V

Conclusions générales

Chapitre 19

Conclusions générales et perspectives

La concentration solaire dans le spatial pourrait constituer une solution pour réduire les coûts des panneaux solaires. Par ailleurs, les cellules MJ ont le monopole pour les applications spatiales, grâce à leur haute efficacité et relativement faible sensibilité aux radiations (en comparaison avec les cellules silicium). Cependant, ces cellules n'ont pas que des avantages. Leur structure impose en effet plusieurs contraintes dont les deux principales sont : (1) une contrainte de correspondance de structure des matériaux, limitant les possibilités quant aux combinaisons de matériaux et augmentant la difficulté de fabrication et donc le coût, et (2) une mise en série des jonctions, limitant le courant global (et donc les performances) à celui de la moins performante des jonctions, rendant la cellule fortement sensible à toute modification de ses conditions d'entrée ou dégradation différentielle de ses jonctions. S'il était possible d'éviter la contrainte de la structure des cellules MJ, l'avantage pourrait être notable, en termes de vieillissement, de tolérance à l'environnement, ainsi que pour le développement d'autres technologies de cellules PV qui n'ont pas encore montré tout leur potentiel.

En réponse, nous avons proposé et développé dans le cadre de cette thèse, un concept de concentrateur solaire simple et léger, avec séparation spectrale, permettant de réduire la surface de cellules PV, et d'utiliser deux cellules complètement indépendantes physiquement et électriquement. L'objectif était donc de déterminer si ce type de combinaison optique est capable de répondre à ces demandes.

La démarche adoptée durant ce travail s'est voulue la plus complète possible dans les limites du temps imparti et des nécessités. Ainsi, nous sommes partis des contraintes de l'environnement spatial pour déterminer la géométrie générale et le matériau le plus adéquat. Nous avons ensuite déterminé les types de réseaux de diffraction potentiellement intéressants, pour lesquels la combinaison avec la lentille de Fresnel « free-form » ainsi que les cellules PV a été optimisée. L'étude a donc fait aussi intervenir la modélisation électrique des cellules PV, et une estimation de leur température de fonctionnement via une simulation thermique. La simplicité du concept ne comprenant qu'un élément optique permet l'utilisation de systèmes de déploiement relativement simples et donc déjà testés et approuvés pour les applications spatiales. Finalement, la fiabilité de nos simulations a été

vérifiée grâce à une réalisation d'un projet connexe (G2D) nous ayant fourni un élément réseau/lentille conçu selon nos modèles, et des tests en laboratoire ont mené à la confirmation de la faisabilité de notre élément optique.

La réflexion ainsi entreprise a mis plusieurs points en avant :

Au niveau des réseaux

- Pour obtenir un taux de concentration global suffisant ($> 5\times$), les réseaux les plus adaptés nécessitent une grande période ($> 20\ \mu\text{m}$).
- La séparation spectrale combinée avec la nécessité d'une tolérance à l'angle d'incidence, impose l'usage de deux ordres de diffraction distincts : les ordres 0 et ± 1 .
- Le choix des réseaux est dès lors limité : seuls ceux présentant une efficacité de diffraction élevée dans ces ordres sont pertinents, soit un réseau blazé (ordres 0 et 1) ou un réseau lamellaire (ordres 0 et ± 1).

Au niveau de la combinaison avec la lentille

- Les ordres de diffraction à focaliser étant séparés, angulairement dispersés, et spectralement différents, une lentille classique n'est pas capable de les focaliser de façon satisfaisante. Une optimisation de la forme de la lentille est donc nécessaire, selon le réseau, sa période, les gammes de longueurs d'onde à focaliser, le $F\#$, le décentrage, et la tolérance au dépointage souhaitée. Une seule combinaison de ces paramètres mène à un taux de concentration maximum, pour une tolérance à l'angle d'incidence donnée. C'est ce dernier paramètre qui est le plus contraignant dans notre design.
- La configuration symétrique mise au point est primordiale pour ce concept de concentrateur avec séparation spectrale : dans le cas du réseau blazé, elle permet d'optimiser la séparation spectrale et rendre le système intéressant en termes d'efficacité, et dans le cas du réseau lamellaire symétrique, elle permet d'atteindre des taux de concentration cohérents avec notre application.
- La combinaison de l'optimisation de la lentille et de la distribution de période du réseau le long de la lentille (similaire à une combinaison de lentilles diffractive et réfractive) selon les méthodes mises en place, permet d'optimiser davantage les résultats.
- L'étude de tolérancement n'a pas révélé de paramètre extrêmement critique. Il faut néanmoins prendre en compte l'indice de réfraction attendu dans les conditions supposées de fonctionnement, et travailler avec le meilleur réseau de diffraction possible. Malgré la configuration linéaire, la précision du pointage selon l'axe linéaire doit être meilleure que 6 à 11° .

Au niveau des performances

- Pour chaque type de réseau, une cartographie de la puissance de sortie idéale peut être établie, en fonction du spectre solaire, de l'efficacité de diffraction du réseau définie par la longueur d'onde de blaze, et de la combinaison des énergies de bande interdite des cellules. Cette cartographie est, comme attendu, moins abrupte que celles des cellules MJ, laissant une plus grande marge pour le choix de la combinaison de cellules PV. Néanmoins, il existe un optimum, liant les deux cellules avec la répartition spectrale reçue sur les cellules PV respectives. Pour chaque type de réseau et de configuration, cette combinaison est légèrement différente, ainsi que la longueur d'onde de blaze optimale.
- De nombreuses pistes et optimisations ont été étudiées pour trouver notamment les configurations de réseaux de diffraction optimales, mais l'efficacité de séparation spectrale est directement liée aux courbes d'efficacité de diffraction de ceux-ci. Par définition, elle ne peut donc pas être parfaitement abrupte. La géométrie du concentrateur permet néanmoins d'y remédier partiellement (dans le cas du réseau blazé par exemple). Ceci implique qu'en début de vie, les performances calculées avec des cellules réelles sont inférieures aux systèmes avec des MJ (en termes de W/m^2 de lentille).
- Le taux de concentration global (largeur de la lentille / surface totale des cellules PV) est limité autour de 5 à $7\times$ (en fonction de la tolérance au dépointage et des types de cellules PV). Ceci reste dans de la faible concentration, ce qui est parfaitement adapté au domaine du spatial : nous observons un gain en W/m^2 de cellules PV ($\sim 80\%$), sans échauffement critique de la cellule.
- La masse spécifique devrait être inférieure à celle d'un panneau plan équivalent, et l'usage de cellules SJ contribue à la réduction de coût du concentrateur.
- La séparation spatiale sur deux cellules permet d'avoir un rendement électrique local plus élevé, et un étalement sur une surface double. La température au niveau des cellules est donc inférieure à celle d'autres concentrateurs focalisant sur une unique cellule PV.
- La séparation spectrale permet de réduire la sensibilité du système face à un jaunissement de la lentille ou de la protection de la cellule, face à une contamination dont l'absorption est spectralement dépendante, face à une dégradation différentielle des cellules, face à toute modification du spectre incident, ainsi que face à une dispersion spectrale sur la cellule. Par rapport à un concentrateur avec des MJ, les performances de notre concentrateur se dégradent moins vite, permettant potentiellement de surpasser les cellules MJ en fin de mission. Cependant, les effets de dégradation sont difficiles à simuler, et actuellement, la dégradation réduite de notre concentrateur ne compense pas ses performances initialement inférieures, sauf pour de fortes modifications de spectre.
- La liberté de choix des cellules offre des perspectives pour améliorer les performances et ouvrir la voie du spatial à d'autres types de cellules PV. Elle permet en outre d'envisager des adaptations à d'autres milieux comme des applications terrestres, pour lesquelles les modifications journalières du spectre solaire sont importantes.

Au niveau expérimental

- Finalement, les tests en laboratoire ont démontré la fiabilité des modèles développés, ainsi que la faisabilité du concentrateur.

Ce travail a donc illustré la faisabilité géométrique du concept : il est possible, par une combinaison d'une lentille et d'un réseau de diffraction, de parvenir à focaliser la lumière en plusieurs zones spectralement différenciées, avec un taux de concentration et une tolérance au dépointage adéquats pour les conditions spatiales. Le concept est principalement limité par les efficacités de diffraction à la fois pour l'efficacité de transmission moyenne et pour l'efficacité de séparation spectrale. Néanmoins, moyennant une étude et une optimisation adaptées, cette non-idéalité peut être compensée et offrir des résultats prometteurs en termes de performances par unité de surface de cellules PV et une sensibilité réduite aux modifications des conditions extérieures. Le concept, pour être avantageux en tout point, nécessite cependant encore quelques recherches et améliorations, comme nous l'avons montré au long de cette thèse.

L'industrie spatiale étant peu réceptive aux évolutions technologiques, celles-ci ne sont envisageables que si elles proposent une avancée majeure en termes de performance et fiabilité. Dans l'immédiat, notre concentrateur ne pourrait donc pas remplacer les technologies éprouvées. Néanmoins, le concept est très souple et adaptable. Certaines adaptations ont d'ailleurs été proposées dans le Chapitre 16. Ainsi, moyennant de plus amples recherches sur l'exploitation de la liberté de combinaison et de technologie des cellules PV, la plus grande adaptabilité à un changement des conditions d'entrée (spectre solaire différent, variable, etc.), ou encore l'étude de réseaux de diffraction futurs plus adaptés, le concept pourrait apporter des propriétés inédites aux panneaux solaires. Celles-ci pourraient d'ailleurs constituer un avantage certain dans le cas de missions spécifiques, par exemple « deep space ».

Références

- [1] A.G. Imenès & D.R. Mills, *Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review*, Solar Energy Materials & Solar Cells **84**, 19-69 (2004).
- [2] A. Mojiri, R. Taylor, E. Thomsen & G. Rosengarten, *Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy - A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews **28**, 654-663 (2013).
- [3] S. Bailey & R. Raffaele, *Space Solar Cells and Arrays*, dans : A. Luque & S. Hegedus (Eds.), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Chap. 10, John Wiley & Sons, 2003.
- [4] D.A. Guidice, V.A. Davis, H.B. Curtis, D.C. Ferguson, D.E. Hastings, F.L. Knight, D.C. Marvin, K.P. Ray, P.S. Severance, J.D. Soldi & M. Van Riet, *Photovoltaic array space power plus diagnostic (PASP Plus) experiment*, Phillips Laboratory, PL-TR-97-1013, mars 1997.
- [5] D.M. Murphy, *The Scarlet Solar Array: Technology Validation and Flight Results*, dans : Deep Space 1 Technology Validation Reports, NASA, JPL Publication 00-10, 2004.
- [6] S. Habraken, J.-M. Defise, J.-P. Collette, P. Rochus, P.-A. D'Odemont & M. Hogge, *Space solar arrays and concentrators*, Acta Astronautica **48**(5-12), 421-429 (2001).
- [7] J.M. Bodeau, *Root cause of the BSS702 concentrator array anomaly*, présenté lors du : Space Power Workshop, Redondo Beach, CA, 21-24 avril 2003.
- [8] <http://www.astronautix.com/craft/hs702.htm>, dernier accès le 20/05/2015.
- [9] T. Thibert, V. Ruelle & J.H. Lecat, *ESP Proba2 - Thermal Analysis Update with Xperion Substrate*, TN-CSL-ESP-07018, CSL, juin 2007.
- [10] T. Thibert, V. Ruelle & J.H. Lecat, *ESP Proba2 - Experimental Solar Panel: Detailed Thermal Study*, TN-CSL-ESP-06017, CSL, juillet 2006.
- [11] Centre Spatial de Liège, *Experimental Solar Panel (ESP) - Final Report*, RP-CSL-ESP-08014, août 2008.
- [12] M.J. O'Neill, M.F. Piszczor, M.I. Eskenazi, A.J. McDanal, P.J. George, M.M. Botke, H.W. Brandhorst, D.L. Edwards & D.T. Hoppe, *Ultra-light stretched Fresnel lens solar concentrator for space power applications*, présenté à : The International Symposium on Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting, San Diego, 3-8 août 2003.
- [13] M.J. O'Neill, *Stretched Fresnel lens solar concentrator for space power*, US Patent, 6 075 200 A (2000).
- [14] <http://www.entechsolar.com/products/spacetechnology.htm>, dernier accès le 24/03/2015.
- [15] M.J. O'Neill, J. Howell, L. Lollar, C. Carrington, N. Suzuki, M. Piszczor, D. Hoppe, M. Eskenazi, D. Aiken, M. Fulton, H. Brandhorst, M. Schuller & A. McDanal, *Stretched lens array squarerigger (SLASR) technology maturation*, NASA/CP-2007-214494, p. 223-236, 2007.
- [16] B.R. Spence, S.F. White, K. Schmid, *Rollable and accordion foldable refractive concentrator space solar array panel*, US Patent, 8 636 253 B1 (2014).
- [17] A. Polman & A. Atwater, *Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics*, Nature Materials **11**, 174-177 (2012).

- [18] L. Zhao, *High Efficiency Mechanically Stacked Multi-junction Solar Cells for Concentrator Photovoltaics*, Thèse de doctorat, Katholieke Universiteit Leuven - Faculteit ingenieurswetenschappen - departement elektrotechniek (ESAT) afdeling Insys, en collaboration avec IMEC, 2011.
 - [19] A.K. Converse, *Refractive spectrum splitting photovoltaic concentrator system*, US Patent, 6 015 950 (2000).
 - [20] D. Caselli & C.Z. Ning, *Monolithically-integrated laterally-arrayed multiple bandgap solar cells for spectrum-splitting photovoltaic systems*, Progress in Quantum Electronics **39**, 24-70 (2015).
 - [21] T. Gu & M.W. Haney, *Ultra-compact Dispersive Concentrator Concept for Laterally-arrayed Multi-junction PV Cells*, dans : Renewable Energy and the Environment Optics and Photonics Congress, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2012), papier JM5A.23.
 - [22] Y. Zhao, M.-Y. Shen, W.-X. Zhou, Y. Shen, E.-T. Hy, J.-B. Chen, M. Xu, Y.-X. Zheng, Y.-P. Lee, D. S. Lynch & L.-Y. Chen, *A solar photovoltaic system with ideal efficiency close to the theoretical limit*, Optics Express **20**(S1), A28-A38 (2012).
 - [23] A. Barnett, D. Kirkpatrick, C. Honsberg, D. Moore, M. Wanless, K. Emery, R. Schwartz, D. Carlson, S. Bowden, D. Aiken, A. Gray, S. Kurtz, L. Kazmerski, M. Steiner, J. Gray, T. Davenport, R. Buelow, L. Takacs, N. Shatz, J. Bortz, O. Jani, K. Goosen, F. Kiamilev, A. Doolittle, I. Ferguson, B. Unger, G. Schmidt, E. Christensen & D. Salzman, *Very High Efficiency Solar Cell Modules*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **17**, 75-83 (2009).
 - [24] I. Bekey, C. Lewis, W. Phillips, V. Shields & P. Stella, *Multi-band Gap High Efficiency Converter (RAINBOW)*, Jet Propulsion Laboratory Technical Report, 1997.
 - [25] T. Gu & M.W. Haney, *Common-plane Spectrum-splitting Concentrating Photovoltaic Module Design and Development*, dans : Renewable Energy and the Environment Optics and Photonics Congress, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2011), papier SRThB4.
 - [26] B. Fisher & J. Biddle, *Luminescent spectral splitting: Efficient spatial division of solar spectrum at low concentration*, Solar Energy Materials & Solar Cells **95**, 1741-1755 (2011).
 - [27] E.R. Torrey, P.P. Ruden & P.I. Cohen, *Performance of a split-spectrum photovoltaic device operating under time-varying spectral conditions*, Journal of Applied Physics **109**, 074909-1 à 7 (2011).
 - [28] J.E. Ludman, J. Riccobono, I.V. Semenova, N.O. Reinhand, W. Tai, X. Li, G. Syphers, E. Rallis, G. Sliker & J. Martin, *The optimization of a holographic system for solar power generation*, Solar Energy **60**(1), 1-9 (1997).
 - [29] G. Kim, J.A. Dominguez-Caballero, H. Lee, D.J. Friedman & R. Menon, *Increased Photovoltaic Power Output via Diffractive Spectrum Separation*, Physical Review Letters **110**, 123901 (2013).
 - [30] R. Menon, *Ultra-high efficiency multi-junction solar cells using polychromatic diffractive concentrators*, US Patent, 0 095 999 A1 (2010).
 - [31] H.A. Atwater & A. Polman, *Plasmonics for improved photovoltaic devices*, Nature Materials **9**, 205-213 (2010).
 - [32] *Fresnel lenses*, Fresnel Technologies, Inc., 2003, <http://www.fresneltech.com/pdf/FresnelLenses.pdf>, dernier accès le 23/07/2015.
 - [33] S.H. Ahn & L.J. Guo, *Large-Area Roll-to-Roll and Roll-to-Plate Nanoimprint Lithography: A Step toward High-Throughput Application of Continuous Nanoimprinting*, ACS Nano **3**(8), 2304-2310 (2009).
 - [34] M.J. O'Neill, A.J. McDanal, P.J. George, M.F. Piszczor, D.L. Edwards, D.T. Hoppe, M.I. Eskenazi, M.M. Botke, P.A. Jaster & H.W. Brandhorst, *Development of the ultra-light stretched lens array*, présenté lors de la : 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), New Orleans, mai 2002.
-

- [35] A. Davis & F. Kühnlenz, *Optical Design using Fresnel Lenses - Basic Principles and some Practical Examples*, *Optik & Photonik* **4**, 52-55 (2007).
 - [36] R.L. Rhorer & C.J. Evans, *Fabrication of Optics by Diamond Turning*, dans : M. Bass, E.W. van Stryland, D.R. Williams & W.L. Wolfe (Eds.), *Handbook of Optics*, Vol. 1, Chap. 41, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1995.
 - [37] E. Hecht, *Optics*, 4^{ème} édition, Addison-Wesley, 2002, p. 476-479.
 - [38] M. Bass, Ed., *Handbook of Optics: Fundamentals, techniques, and design*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1994, Volume 1.
 - [39] M.S. Dresselhaus, *Solid State Physics Part II Optical Properties of Solids*, Course 6.732 Solid State Physics. MIT. (1999).
 - [40] T.K. Gaylord & M.G. Moharam, *Analysis and applications of optical diffraction by gratings*, *Proceedings of IEEE* **73**, 894-937 (1985).
 - [41] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Chap. 3, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1968.
 - [42] G.J. Swanson, *Binary Optics Technology: The Theory and Design of Multi-level Diffractive Optical Elements*, Technical Report **854**, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1989.
 - [43] D.A. Pomet, M.G. Moharam & E.B. Grann, *Limits of scalar diffraction theory for diffractive phase elements*, *Journal of the Optical Society of America A* **11**(6), 1827-1834 (1994).
 - [44] G.J. Swanson, *Binary Optics Technology: Theoretical Limits on the Diffraction Efficiency of Multilevel Diffractive Optical Elements*, Technical Report **914** (AD-A235 404), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1991.
 - [45] H.-J. Wang, D.-F. Kuang, X.-D. Sun & Z.-L. Fang, *Period interaction on diffraction efficiency of blazed transmission gratings*, *Optik* **121**, 1511-1515 (2010).
 - [46] H. Wang, D. Kuang & Z. Fang, *Diffraction analysis of blazed transmission gratings with a modified extended scalar theory*, *Journal of the Optical Society of America A* **25**(6), 1253-1259 (2008).
 - [47] Voir documentations sur le site <http://www.pcgrate.com>, dernier accès le 25/06/2015.
 - [48] J. Francés, C. Neipp, S. Gallego, S. Bleda, A. Márquez, I. Pascual & A. Beléndez, *Comparison of simplified theories in the analysis of the diffraction efficiency in surface-relief gratings*, *Proceedings of SPIE* **8429**, 84291U-9 (2012).
 - [49] H. Rathgen & H.L. Offerhaus, *Large bandwidth, highly efficient optical gratings through high index materials*, *Optics Express* **17**, 4268-4283 (2009).
 - [50] Jef Poortmans, *H09Z5A - Materials and Devices for Photovoltaic Applications*, cours dispensé à Imec en 2013.
 - [51] S.M. Sze & K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
 - [52] M.A. Green, *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*, Prentice-Hall Series in Solid State Physical Electronics, Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1982, p. 80-88.
 - [53] A. Luque & S. Hegedus (Eds.), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2003, p. 106-107.
 - [54] A. Luque & V. Andreev, *Concentrator Photovoltaics*, Springer Series in Optical Sciences, 2007.
 - [55] N.V. Yastrebova, *High-efficiency multi-junction solar cells: current status and future potential*, Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, avril 2007.
 - [56] S.R. Kurtz & M.J. O'Neill, *Estimating and controlling chromatic aberration losses for two-junction two-terminal devices in refractive concentrator systems*, *Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 361-364 (1996).
-

- [57] R. Leutz, A. Suzuki, A. Akisawa & T. Kashiwagi, *Flux Uniformity and Spectral Reproduction in Solar Concentrators Using Secondary Optics*, Proceedings ISES Solar World Congress, Adelaide, Australia, 2001.
 - [58] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka & T. Fuyuki, *Evaluation of temperature characteristic of high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells under concentration*, Solar Energy Materials & Solar Cells **85**, 429-436 (2005).
 - [59] Y. Varshni, *Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors*, Physica **34**, 149-154 (1967).
 - [60] P. Singh & N.M. Ravindra, *Temperature dependence of solar cell performance - an analysis*, Solar Energy Materials & Solar Cells **101**, 36-45 (2012).
 - [61] <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/palankovski/node37.html>, dernier accès le 26/03/2015.
 - [62] <http://nl.mathworks.com/products/matlab/>, dernier accès le 24/08/2015.
 - [63] R. Poerschke & O. Madelung (Eds.), *Library of Congress Cataloging-in-Publication Data / Semiconductors: Group IV Elements and III-V Compounds (Data in Science and Technology)*, Springer-Verlag, 1991, p. 28-37 et 101-109.
 - [64] M. Yamaguchi, *Multi-junction solar cells and novel structures for solar cell applications*, Physica E **14**, 84-90 (2002).
 - [65] S. Lu, L. Ji, W. He, P. Dai, H. Yang, M. Arimochi, H. Yoshida, S. Uchida & M. Ikeda, *High-efficiency GaAs and GaInP solar cells grown by all solid-state molecular-beam-epitaxy*, Nanoscale Research Letters **6**(1), 1-4 (2011).
 - [66] Z.S. Bittner, *Design, Fabrication, and Characterization of Solar Cells for High Temperature and High Radiation Space Applications*, Thèse de doctorat, Rochester Institute of Technology - Department of Materials Science & Engineering, 2012.
 - [67] N. Dharmarasu, M. Yamaguchi & A. Khan, *High-radiation-resistant InGaP, InGaAsP, and InGaAs solar cells for multijunction solar cells*, Applied Physics Letters **79**(15), 2399-2401 (2001).
 - [68] F. Granek, *High-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells*, Thèse de doctorat, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg im Breisgau, 2009.
 - [69] D.D. Smith, P.J. Cousins, A. Masad, A. Waldhauer, S. Westerberg, M. Johnson, X. Tu, T. Dennis, G. Harley, G. Solomon, S. Rim, M. Shepherd, S. Harrington, M. Defensor, A. Leygo, P. Tomada, J. Wu, T. Pass, L. Ann, L. Smith, N. Bergstrom, C. Nicdao, P. Tipones & D. Vicente, *Generation III High Efficiency Lower Cost Technology: Transition to full scale Manufacturing*, Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaics Special Conference, 001594-001597 (2012).
 - [70] M.A. Stan, D. Aiken, P.R. Sharps, J. Hills, B. Clevenver & J.S. Fatemi, *The development of >28% efficient triple-junction space solar cells at Emcore photovoltaics*, Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion **1**, 662-665 (2003).
 - [71] T. Takamoto, M. Yamaguchi, S.J. Taylor, M.-J. Yang, E. Ikeda & H. Kurita, *Radiation resistance of high-efficiency InGaP/GaAs tandem solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells **58**, 265-276 (1999).
 - [72] National Renewable Energy Laboratory, Renewable Resource Data Center, *Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173*, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>, dernier accès le 13/02/2015.
 - [73] D.G. Gilmore & W.K. Stuckey, *Thermal surface finishes*, dans : D.G. Gilmore (Ed.), *Satellite Thermal Control Handbook*, Chap. 4, The Aerospace Cooperation Press, 1994.
 - [74] Emcore, *Advanced Triple-Junction (ATJ) High Efficiency Solar Cells for Space Applications*, Fiche produit.
 - [75] P. Rochus, [AERO0018-3] *Conception d'expériences spatiales*, cours dispensé à l'ULg.
-

- [76] B. Tadic-Galeb, *Basic Optics and Optical System Specifications*, dans : R.E. Fischer, B. Tadic-Galeb & P.R. Yoder (Eds.), *Optical system design*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
 - [77] J.A. Dever, B.A. Banks & L. Yan, *Vacuum ultraviolet radiation effects on DC93-500 silicone film*, dans : J.I. Kleiman (Ed.), *Space Technology Proceedings, Protection of Materials and Structures from Space Environment*, Vol. 6, Springer, 2006, p. 123-140.
 - [78] D.T. Hoppe, D.L. Edwards, C.L. Semmel, M.J. O'Neill & A.J. McDanal, *Optical stability of silicone lens material after exposure to emulated space environmental radiation*, *Proceedings of SPIE* **5179**, Optical Materials and Structures Technologies, 105-115 (2003).
 - [79] C.G. Zimmermann, *Time dependent degradation of photovoltaic modules by ultraviolet light*, *Applied Physics Letters* **92**, 241110 (2008).
 - [80] H.R. Fischer, C. Semprimoschnig, C. Mooney, T. Rohr, E.R.H. van Eck & M.H.W. Verkuijlen, *Degradation mechanism of silicone glues under UV irradiation and options for designing materials with increased stability*, *Polymer Degradation and Stability* **98**, 720-726 (2013).
 - [81] D.L. Liu, S.H. Liu, C.J. Panetta, K.R. Olson, S.M. Hong, D.R. Alaan, C.J. Mann & K.T. Luey, *Effects of contamination on solar cell coverglass*, *Proceedings of 35th IEEE PVSC*, 002563-002568 (2010).
 - [82] A.C. Tribble, B. Boyadjian, J. Davis, J. Haffner & E. McCullough, *Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community*, NASA-MSFC, Contractor Report 4740, 1996.
 - [83] D.F. Hall & D.C. Marvin, *Effects of molecular contamination on triple junction solar cells*, *Proceedings of SPIE* **4774**, 129-134 (2002).
 - [84] D.C. Marvin & W.C. Hwang, *Contamination Effects of GPS Navstar Solar Array Performance*, dans : *Space Photovoltaic Research and Technology*, NASA Conference Publication **3030**, 19-21 avril 1988, p. 301-305.
 - [85] G.A. Landis, P. Jenkins, D. Scheiman & R. Rafaele, *Extended Temperature Solar Cell Technology Development*, 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, Providence RI, 16-19 août 2004, paper AIAA-2004-5578.
 - [86] T.E. Girish, *Nighttime operation of photovoltaic systems in planetary bodies*, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **90**, 825-831 (2006).
 - [87] D.G. Gilmore (Ed.), *Spacecraft Thermal Control Handbook - Volume 1: Fundamental Technologies*, The Aerospace Press & American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002.
 - [88] *Earth's Thermal Environment*, Thermal Environments JPL D-8160, K&K Associates, voir <http://www.tak2000.com/data/planets/earth.htm>, dernier accès le 26/06/2015.
 - [89] C.J. Ercol, *Return to Mercury: An overview of the MESSENGER spacecraft thermal control system design and up-to-date flight performance*, *SAE International Journal of Aerospace* **1**, 405-419 (2009).
 - [90] M. O'Neill, A.J. McDanal, H. Brandhorst, K. Schmid, P. LaCorte, M. Piszczor & M. Myers, *Recent Space PV Concentrator Advances: More Robust, Lighter and Easier to Track*, présenté lors de la : 42th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), New Orleans, juin 2015.
 - [91] A. Bejan, *Heat Transfer Handbook*, John Wiley and Sons, 1993.
 - [92] <https://www.esatan-tms.com/index.php>, dernier accès le 22/08/2015.
 - [93] A.10.5. D.C. 93500, voir http://esmat.esa.int/a10_5.htm, dernier accès le 30/05/2013.
 - [94] <http://www.anton-paar.com/be-fr/produits/details/refractometre-a-longueurs-dondes-multiples-abbemat-wr-mw/>, dernier accès le 13/08/2015.
 - [95] S.N. Kasarova, N.G. Sultanova, C.D. Ivanov & I.D. Nikolov, *Analysis of the dispersion of optical plastic materials*, *Optical Materials* **29**(11), 1481-1490 (2007).
-

- [96] M.L. Fulton & M.J. O'Neill, *Advanced optical coating technology used in the development of concentrator arrays for solar space power applications*, Proceedings of SPIE **6286**, 628606 (2006).
 - [97] P. McDermott, H. Lewis, M. O'Neill & H. Brandhorst, *Solar Array Hardening Against Natural and Man-Made Radiation and Thermal Environments Using the Stretched Lens Array (SLA) Concept*, présenté lors du : Space Power Workshop, Los Angeles, 24 avril 2007.
 - [98] P.P. Jenkins, D.C. Bentz, J. Barnds, C.R. Binz, S.R. Messenger, J.H. Warner, M.J. Krasowski, N.F. Prokop, D.C. Spina, M. O'Neill, M. Eskenazi, H.W. Brandhorst, E. Downard, & K.C. Crist, *Initial Results from the TacSat-4 Solar Cell Experiment*, présenté lors de la : 39th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Tampa, 16-21 juin 2013.
 - [99] D.L. Edwards, W.C. Hubbs, D.J. Willowby, M.F. Piszczor, Jr., & Dr. M.L. Bowden, *Space environmental effects on the optical properties of selected transparent polymers*, dans : D.E. Claridge, J.E. Pacheco (Eds.), *Solar Engineering*, ASME, 1997.
 - [100] D.L. Edwards, M.M. Finckenor, M.J. O'Neill & A.J. McDanal, *Optical analysis of transparent polymeric material exposed to simulated space environment*, Proceedings of SPIE **4134**, Photonics for Space Environments VII, 56-64 (2000).
 - [101] <http://www.qioptiq.com/space.html>, *Solar Cell Coverglass*, dernier accès le 23/07/2015.
 - [102] M.J. O'Neill, *A Stretched Fresnel Lens Solar Concentrator for Space Power, with Cords, Fibers, or Wires Strengthening the Stretched Lens*, US Patent, 0 022 909 A1 (2015).
 - [103] *Design of Diffraction Gratings*, dans : D.C. O'Shea, T.J. Suleski, D. Kathman & D.W. Prather, *Diffraction Optics: Design, Fabrication, and Test*, SPIE Tutorial Texts in Optical Engineering, 2003, Vol. TT62, p. 85-86.
 - [104] J.M. Russo, D. Zhang, M. Gordon, S. Vorndran, Y. Wu & R.K. Kostuk, *Spectrum splitting metrics and effect of filter characteristics on photovoltaic system performance*, Optics Express **22**(S2), A528-A541 (2014).
 - [105] <http://www.breault.com/software/about-asap>, dernier accès le 17/08/2015.
 - [106] R. Leutz, A. Suzuki, A. Akisava & T. Kashiwagi, *Developments and designs of solar engineering Fresnel lenses*, Proceedings Symposium on Energy Engineering **2**, 759-765 (2000).
 - [107] J.J. O'Gallagher, *Nonimaging optics in solar energy*, Morgan & Claypool, 2008.
 - [108] A. Davis, *Raytrace assisted analytical formulation of Fresnel lens transmission efficiency*, Proceedings of SPIE **7429**, 74290D-1 - 74290D-12 (2009).
 - [109] R. Winston, J.C. Miñano & P. Benítez, *Nonimaging Optics*, Elsevier Inc., 2005.
 - [110] F. Languy, *Achromatization of Nonimaging Fresnel Lenses for Photovoltaic Solar Concentration using Refractive and Diffractive Patterns*, Thèse de doctorat, Hololab, Faculté des Sciences, Université de Liège, 2012.
 - [111] M. O'Neill, M. Piszczor, P. George, M. Eskenazi, M. Botke, D. Edwards, D. Hoppe, & G. Brandhorst, *Recent progress on the stretched lens array (SLA)*, NASA/CP-2005-213431.
 - [112] J.-H. Hsu, C.-H. Lee, & R. Chen, *A high-efficiency multi-beam splitter for optical pickups using ultra-precision manufacturing*, Microelectronic Engineering **113**, 74-79 (2014).
 - [113] T. Hessler, M. Rossi, R.E. Kunz & M.T. Gale, *Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements*, Applied Optics **37**(19), 4069-4079 (1998).
 - [114] J.E. Harvey, S. Schröder, N. Choi & A. Duparré, *Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths and incident angles*, Optical Engineering **51**(1), 013402 (2012).
 - [115] Y. Tamagawa & Y. Ichioka, *Efficiency of Blazed Diffractive Optics Produced by Diamond Turning*, Optical Review **5**(5), 291-294 (1998).
 - [116] Z.W. Xu, F.Z. Fang, S.J. Zhang, X.D. Zhang, X.T. Hu, Y.Q. Fu & L. Li, *Fabrication of micro DOE using micro tools shaped with focused ion beam*, Optics Express **18**(8) (2010).
-

- [117] N.P. Johnson, *Facet deformation minimizing fresnel lens die roller and manufacturing method*, US Patent, 0 177 768 (2012).
 - [118] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>, dernier accès le 13/03/2015.
 - [119] L. Jing, H. Liu, Y. Wang, W. Xu, H. Zhang, & Z. Lu, *Design and Optimization of Fresnel Lens for High Concentration Photovoltaic System*, International Journal of Photoenergy **2014**, ID 539891 (2014).
 - [120] L.M. Averina & Y.S. Milyavskii, *Temperature dependence of the refractive index of acrylate elastomers*, Journal of Optical Technology **71**(4) (2004).
 - [121] D. Doyle, *Radiation Hardness of Optical Materials*, présenté lors du : 3th Europa Jupiter System Mission Instrument Workshop, ESA ESTEC, janvier 2010.
 - [122] G. Furano, R. Jansen & A. Menicucci, *Review of radiation hard electronics activities at European Space Agency*, présenté lors du : Topical workshop on electronics for particle physics, Oxford, U.K., 17-21 septembre 2012.
 - [123] P.M. Stella, D.G. Nieraeth, D.M. Murphy, M.I. Eskenazi, & J. Stubstad, *Validation of the SCARLET advanced array on DS1*, Proceedings of the 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference **1999-01-2630** (1999).
 - [124] P. Fortescue, J. Stark, & G. Swinerd, *Spacecraft systems engineering*, Wiley Third Edition, 2004.
 - [125] K. Kwok & S. Pellegrino, *Folding, Stowage, and Deployment of Viscoelastic Tape Springs*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal **51**(8), 1908-1918 (2013).
 - [126] G.G. Herzl, *Tubular Spacecraft Booms (Extendible, Reel Stored)*, NASA SP-8065 (1971).
 - [127] T.W. Murphey, S. Jeon, A. Biskner & G. Sanford, *Deployable Booms and Antennas Using Bi-stable Tape-springs*, Proceedings of the 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites **SSC10-X-6.24** (2010).
 - [128] J.J. Wachholz & D.M. Murphy, *SCARLET I: Mechanization solutions for deployable concentrator optics integrated with rigid array technology*, NASA Conference Publication **3328**, 135-144 (1996).
 - [129] http://www.surrey.ac.uk/ssc/research/space_vehicle_control/cubesail/science_and_tech/masts/index.htm, dernier accès le 19/02/2015.
 - [130] T.J. Harvey, P.A. Jones, A.F. Fraser, *Stowable and deployable concentrator for solar cells*, US Patent, 5 496 414 A (1996).
 - [131] P.A. Jones, T.J. Harvey, A.F. Fraser & D.M. Murphy, *Stowable and deployable solar energy concentrator with Fresnel lenses*, US Patent, 5 578 139 (1996).
 - [132] X. Gao, S.-S. Yang & Z.-Z. Feng, *Radiation Effects of Space Solar Cells*, dans : X. Wang, Z.M. Wang (Eds.), *High-Efficiency Solar Cells: Physics, Materials, and Devices*, Springer Series in Materials Science, Vol. 190, 2014.
 - [133] <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-space/space-solar-cells>, dernier accès le 17/08/2015.
 - [134] V.A. Shuvalov, G.S. Kochubei, V.V. Gubin & N.A. Tokmak, *Power Losses of Solar Arrays under the Action of an Environment in a Geosynchronous Orbit*, Cosmic Research **43**(4), 259-267 (2005).
 - [135] C.G. Zimmermann, *On the kinetics of photodegradation in transparent silicones*, Journal of Applied Physics **103**(8), 083547 (2008).
 - [136] J. Visentine, W. Kinard, D. Brinker, D. Scheiman, B. Banks, K. Albyn, S. Hornung & T. See, *MIR Solar array return experiment: power performance measurement and molecular contamination analysis results*, American Institute of Aeronautics and Astronautics **0684**, A01-16529 (2001).
-

- [137] S. Sato, H. Miyamoto, M. Imaizumi, K. Shimazaki, C. Morioka, K. Kawano & T. Ohshima, *Degradation modeling of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated with various-energy protons*, Solar Energy Materials & Solar Cells **93**(6), 768-773 (2008).
 - [138] P. Patel, D. Aiken, A. Boca, B. Cho, D. Chumney, M.B. Clevenger, A. Cornfeld, N. Fatemi, Y. Lin, J. McCarty, F. Newman, P. Sharps, J. Spann, M. Stan, J. Steinfeldt, C. Strautin & T. Varghese, *Experimental Results from Performance Improvement and Radiation Hardening of Inverted Metamorphic Multi-Junction*, présenté lors de la : 38th Photovoltaic Specialist Conference - Solar Photovoltaic, Seattle, WA, 2011.
 - [139] M. Yamaguchi, *Radiation-resistance solar cells for space use*, Solar Energy Materials & Solar Cells **68**, 31-53 (2001).
 - [140] E.T. Franklin & J.S. Coventry, *Effects of Highly Non-uniform Illumination Distribution on Electrical Performance of Solar Cells*, présenté lors de la : 40th annual conference for the Australian New Zealand solar energy society, 2004.
 - [141] Y. Ota & K. Nishioka, *Three-dimensional simulating of concentrator photovoltaic modules using ray trace and equivalent circuit simulators*, Solar Energy **86**, 476-481 (2012).
 - [142] I. Garcia, P. Espinet-González, I. Rey-Stolle & C. Algora, *Analysis of Chromatic Aberration Effects in Triple-Junction Solar Cells Using Advanced Distributed Models*, IEEE Journal of Photovoltaics **1**, 219-224 (2011).
 - [143] H. Baig, K.C. Heasman & T.K. Mallick, *Non-uniform illumination in concentrating solar cells*, Renewable and Sustainable Energy Reviews **16**, 5890-5909 (2012).
 - [144] R. Herrero, M. Victoria, C. Domínguez, S. Askins, I. Antón & G. Sala, *Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **20**(4), 423-430 (2012).
 - [145] M.J. O'Neill, *Color-mixing lens for solar concentrator system and methods of manufacture and operation thereof*, US Patent, 6 031 179 (2000).
 - [146] M.J. O'Neill, *Line-focus optics for multijunction cells in space power arrays*, présenté lors de la : 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, mai 1996.
 - [147] Kazunori Shimazaki, *Optical thin film for solar cells and method of forming the same*, US Patent, 7 999 177 B2 (2006).
 - [148] Kyung-Sang Cho & Byung-ki Kim, *Energy conversion film and quantum dot film comprising quantum dot compound, energy conversion layer including the quantum dot film, and solar cell including the energy conversion layer*, US Patent, 7 791 157 B2 (2006).
 - [149] R.B. Laghumavarapu, A. Moscho, A. Khoshakhlagh, M. El-Emawy, L.F. Lester & D.L. Hufaker, *GaSb/GaAs type II quantum dot solar cells for enhanced infrared spectral response*, Applied Physics Letters **90**, 173125 (2007).
 - [150] L.Z. Broderick, B.R. Albert, B.S. Pearson, L.C. Kimerling & J. Michel, *Design for energy: Modeling of spectrum, temperature and device structure dependences of solar cell energy production*, Solar Energy Materials & Solar Cells **136**, 48-63 (2015).
 - [151] P. Blain, C. Michel, L. Clermont, F. Languy, M. Décultot, S. Habraken, C. Lenaerts, K. Fleury, D. Vandormael & J. Loicq, *Spectral splitting planar solar concentrator: experimental testing of a design aiming at dye sensitized solar cells*, Proceedings of SPIE Brussel, Photonics for Solar Energy Systems V, **91400S** (2014).
 - [152] K.M. Edmondson, D.E. Joslin, C.M. Fetzer, R.R. King, N.H. Karam, N. Mardesich, P.M. Stella, D. Rapp & R. Mueller, *Simulation of the Mars surface solar spectra for optimized performance of triple-junction solar cells*, Proceedings of the 19th Space Photovoltaic Research and Technology Conference **100**(90), 80 (2005).
 - [153] R. Hoheisel, S.P. Philipps & A.W. Bett, *Long-term energy production of III-V triple-junction solar cells on the Martian surface*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **18**, 90-99 (2010).
-

-
- [154] W. Jin-Ze, Y. Jia-Sheng, H. Qing-Li, X. Xin, L. Dong-Mei, M. Qing-Bo & Y. Guo-Zhen, *Design optimization of highly efficient spectrum-splitting and beam-concentrating diffractive optical element for lateral multijunction solar cells*, Chinese Physics B **23**(4), 044211 (2014).
- [155] W. Jin-Ze, H. Qing-Li, X. Xin, Q. Bao-Gang, L. Jian-Heng, Z. Yan, Y. Jia-Sheng, L. Dong-Mei, M. Qing-Bo & Y. Guo-Zhen, *Realizing high photovoltaic efficiency with parallel multijunction solar cells based on spectrum-splitting and -concentrating diffractive optical element*, Chinese Physics B **24**(5), 054201 (2015).
- [156] G.K. Thalluri, M. Décultot, C. Henrist, J. Dewalque, P. Colson, S. Habraken, D. Spoltore, J. Manca & R. Cloots, *Morphological and opto-electrical properties of a solution deposited platinum counter electrode for low cost dye sensitized solar cells*, Physical Chemistry Chemical Physics **15**(45), 19799-19806 (2013).
- [157] <http://www.b-phot.org/>, dernier accès le 14/08/2015.
- [158] <http://www.sirris.be/>, dernier accès le 14/08/2015.
- [159] <http://www.gratinglab.com/Home.aspx>, dernier accès le 14/08/2015.
- [160] Groupe de Recherche en Energie et ENvironnement à partir des MATériaux (GREEnMat), ULg, <http://www.lcis.ulg.ac.be/>, dernier accès le 14/08/2015.
- [161] <http://www.sensofar.com/metrology/sneox/> et http://www.sensofar.com/wp-content/uploads/2015/07/TechDoc_Objectives-Specifications-S-neox-EN.pdf, dernier accès le 14/08/2015.
- [162] T. Thibert, M.-L. Hellin, J. Loicq, E. Mazy, J.-M. Gillis, F. Languy, S. Habraken, J.-H. Lecat & J.-M. Defise, *Continuous solar simulator for concentrator photovoltaic systems*, présenté lors de la : 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 septembre 2010.
- [163] Rapport de projet, *TROPOMI - Sun simulator - Towards an homogenous collimated beam for TROPOMI - Simulation and experimental testing*, 2014.
- [164] I.D. Johnston, D.K. McCluskey, C.K.L. Tan & M.C. Tracey, *Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering*, Journal of Micromechanics and Microengineering **24**(3), 035017 (2014).
- [165] 3.00" × 3.00", 6.0" FL, Cylinder Fresnel Lens, <http://www.edmundoptics.fr/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/cylinder-fresnel-lenses/43-033>, dernier accès le 19/02/2014.
- [166] R. Surampudi, T. Hamilton & al., *Solar cell and array technology for future space science missions*, NASA, juin 2002.
- [167] S.W. Benson, *Solar power for outer planets study*, présentation pour le « Outer Planets Assessment Group », National Aeronautics and Space Administration, 8 novembre 2007.
- [168] T.M. de Jong, D.K.G. de Boer & C.W.M. Bastiaansen, *Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators*, Optics Express **19**(16), 15127-15142 (2011).
- [169] P.D. Wienhold & D.F. Persons, *The development of high-temperature composite solar array substrate panels for the MESSENGER spacecraft*, Sampe Journal **39**(6), 6-17 (2003).
- [170] D.A. Jaworske, G.C. Tuan, D.T. Westheimer, W.C. Peters & L.R. Kauder, *Optical Properties of Thermal Control Coatings After Weathering, Simulated Ascent Heating, and Simulated Space Radiation Exposure*, NASA/TM - 2008-215259, préparé pour le : 39th Central Regional Meeting of the American Chemical Society, Columbus, Ohio, 10-14 juin 2008.
- [171] Dow Corning, *Product Information : DOW CORNING 93-500 Space-Grade Encapsulant*.
- [172] European cooperation for space standardization, *Space product assurance - Data for selection of space materials and processes*, ECSS-Q-70-71A rev. 1, 18 juin 2004.
- [173] J.-F. Peltier, J. Pernon & M. Rabinovitch, *High Dimensional Stability Structure: Continuous Fibre Metal Matrix Composites*, présenté lors du : Workshop on Advanced Materials for High Precision Detectors, CERN, septembre 1994.
-

- [174] R. Rolfes & U. Hammerschmidt, *Transverse thermal conductivity of CFRP laminates: a numerical and experimental validation of approximation formulae*, Composites Science and Technology **54**, 45-54 (1995).
 - [175] G.S. Springer & S.W. Tsai, *Thermal conductivities of unidirectional materials*, Journal of Composite Materials **1**, 166-173 (1967).
 - [176] J.P. Harris, B. Yates, J. Batchelor & P.J. Carrington, *The thermal conductivity of Kevlar fibre-reinforced composites*, Journal of Materials Science **17**, 2925-2931 (1982).
 - [177] M.W. Pilling, B. Yates, M.A. Black & P. Tattersall, *The thermal conductivity of carbon fibre-reinforced composites*, Journal of Materials Science **14**, 1326-1328 (1979).
 - [178] S.-Y. Fu & Y.-W. Mai, *Thermal Conductivity of Misaligned Short-Fiber-Reinforced Polymer Composites*, Journal of Applied Polymer Science **88**, 1497-1505 (2003).
 - [179] N. Ogasawara, M. Shiratori, Q. Yu & T. Kurahara, *Estimation of Orthotropic Thermal Conductivity of Honeycomb Material*, Heat Transfer - Asian Research **31**(8), 617-625 (2002).
 - [180] V. Legat, [FSAB1104] *Mathématiques et méthodes numériques*, cours dispensé à l'Ecole Polytechnique de Louvain, UCL, voir <http://www.uclouvain.be/32190.html>, dernier accès le 18/03/2015.
 - [181] Breault Research Organization, Inc., *ASAP Technical Guide - Diffraction Gratings and DOEs*, 2013.
 - [182] J.J. Cowan, *Aztec surface-relief volume diffractive structure*, Journal of the Optical Society of America A **7**(8), 1529-1544 (1990).
 - [183] M. Rubin, *Optical Constants and Bulk Optical Properties of Soda Lime Silica Glasses for Windows*, Solar Energy Materials **12**, 275-288 (1984).
 - [184] Thorlabs, 100 mm linear translation stage, stepper motor, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2131&pn=NRT100, dernier accès le 03/03/2015.
 - [185] <http://telab.vuse.vanderbilt.edu/docs/specs/avaspec-2048.pdf>, dernier accès le 31/07/2015.
 - [186] http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1400&pn=P50S, dernier accès le 31/07/2015.
 - [187] <http://www.npl.co.uk/science-technology/mass-and-force/hardness/rubber-hardness>, dernier accès le 29/06/2015.
-

Annexes

Annexe A Comportement des cellules PV sous LILT conditions

Il est reconnu que les cellules PV rencontrent de larges pertes d'efficacité à basse température et faible illumination (Low Intensity Low Temperature - LILT- conditions), conditions typiquement rencontrées pour des orbites à plus de 2-3 U.A. du soleil [166]. Les causes de cet effet, décrit notamment en Figure A.1, ne sont pas bien identifiées, et il n'existe pas de modèle théorique actuellement.

Les pertes proviennent principalement du « gel » des porteurs électriques, réduisant la quantité de porteurs excités et donc la conduction et le champ électrique dans la jonction [166]. De plus, les pertes de « shunt » sont amplifiées parallèlement à la diminution du courant principal avec la baisse d'intensité.

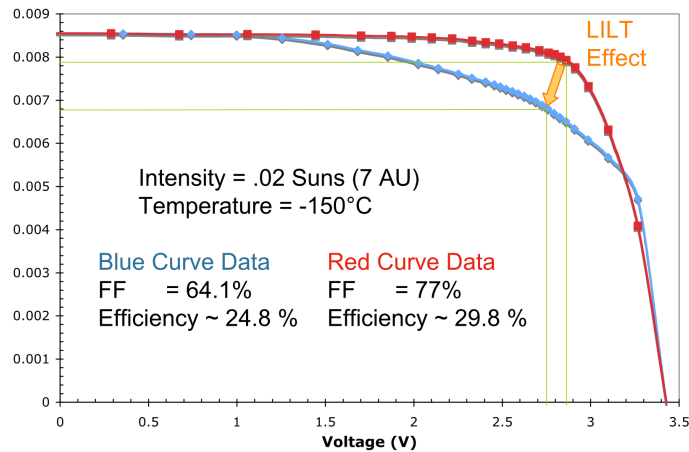


FIGURE A.1 – Illustration de l'effet LILT sur une cellule MJ [167].

Cet effet est très important pour les missions lointaines, puisque l'intensité lumineuse reçue diminue avec la distance au Soleil. Néanmoins, une méthode simple pour mitiger cette dégradation est évidemment la concentration solaire, permettant d'accroître l'illumination au niveau des cellules. Ainsi, on gagne par exemple 5% de rendement au niveau de Saturne, si l'on a un taux de concentration de $8\times$ [167]. L'avantage de la concentration est donc certain dans ce domaine. Bien sûr, d'autres solutions sont aussi envisageables bien que hautement complexes, comme l'optimisation directe des cellules PV pour survivre à ces

conditions. Actuellement, outre deux SJ (Silicium et GaAs) [86], aucune cellule n'a encore été optimisée suffisamment pour rencontrer les contraintes de l'environnement en LILT, la concentration solaire demeure donc une des pistes principales.

Peut-être démontrera-t-on de plus que le comportement des cellules SJ sous LILT est meilleur que celui des MJ, ajoutant à l'avantage de la concentration, celui de la séparation spectrale de notre concentrateur.

Annexe B Coefficients de Fresnel

Les fractions réfléchies et transmises au niveau d'une interface sont définies par les coefficients de Fresnel. Soit une interface entre un milieu 1 d'indice n_1 et un milieu 2 d'indice n_2 , les coefficients de réflexion suivent alors les expressions suivantes [38] :

$$r_{\text{TE}} = \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \quad (\text{B.1})$$

$$r_{\text{TM}} = \frac{n_2 \cos(\theta_1) - n_1 \cos(\theta_2)}{n_2 \cos(\theta_1) + n_1 \cos(\theta_2)} \quad (\text{B.2})$$

où les angles θ_{milieu} sont définis par rapport à la normale à l'interface entre les milieux 1 et 2. L'énergie réfléchie à l'interface vaut alors $R = r^2$. La lumière du soleil étant non-polarisée, la réflectivité s'exprimera par

$$R = \frac{1}{2}(r_{\text{TE}}^2 + r_{\text{TM}}^2)$$

Soit un film d'indice n_2 absorbant, dans de l'air. La partie de la lumière transmise au travers du film suit la relation

$$T = (1 - R_1)(1 - A)(1 - R_2)$$

avec R_1 et R_2 les réflectivités respectives des interfaces 1 (air→milieu 2) et 2 (milieu 2→air), et A l'absorption de la couche de matériau traversée (dépendant de son coefficient d'absorption et de son épaisseur).

Annexe C Efficacité des réseaux de diffraction

C.1 Validité de la théorie scalaire

Sur la Figure C.1, on observe que la théorie scalaire (rendement indépendant de la période du réseau) est valable pour les grandes périodes uniquement. La diminution de l'efficacité pour de plus petites périodes peut être décrite en partie par l'insertion de pertes optiques dues à l'ombrage des dents du réseau (non-prises en compte dans la théorie scalaire), ce qu'illustre la Figure C.2. En effet, comme la hauteur du réseau demeure la même, une réduction de la période va accroître proportionnellement la fraction de zone morte par période, et donc induire des pertes optiques.

Cette méthode toujours basée sur l'optique géométrique, permet de se rapprocher des résultats des théories rigoureuses pour des périodes intermédiaires, c.-à-d. ne répondant plus tout à fait à la théorie scalaire, mais toujours dans un rapport élevé Λ/λ . Cette approche s'appelle « théorie scalaire étendue » [44]. Elle a par la suite été améliorée pour prendre en compte les interactions entre périodes, etc. [45, 46], alors nommée « théorie scalaire étendue modifiée ».

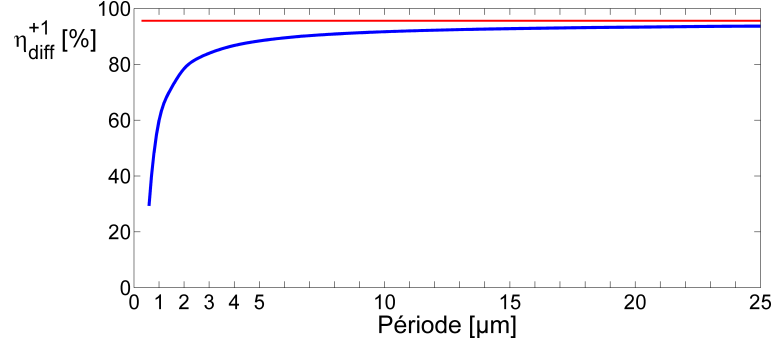


FIGURE C.1 – Simulation PC-Grate® : Efficacité de diffraction au premier ordre d'un réseau de diffraction blazé de hauteur 700 nm, en fonction de sa période, à une longueur d'onde de 390nm. Matériau = BK7, efficacité de diffraction dans le matériau. Les lignes rouge et bleue correspondent respectivement aux simulations via la théorie scalaire, et via PC-Grate® (théorie rigoureuse). On voit que plus la période du réseau est grande, plus l'approximation de la théorie scalaire devient précise.

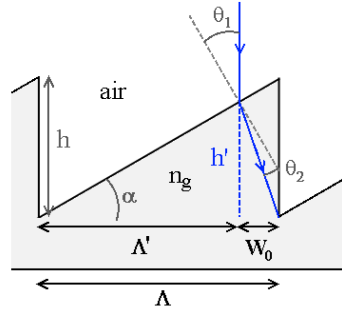


FIGURE C.2 – Schéma d'une dent de réseau de diffraction, avec W_0 la zone d'ombrage ([110]).

C.2 Dépendance avec l'angle d'incidence

La dépendance de l'efficacité de diffraction selon l'angle d'incidence est illustrée en Figure C.3, pour l'ordre 1 à $\lambda = \lambda_{\text{blaze}}$, et une période de 20 μm . Comme annoncé, elle varie très peu avec l'angle d'incidence, appuyant l'hypothèse choisie d'utiliser la théorie scalaire et de considérer l'efficacité de diffraction indépendante de l'incidence (pour autant qu'elle soit inférieure à environ 10°).

La différence de dépendance avec l'angle d'incidence pour un réseau de période 15 μm et 600 nm est aussi bien mise en évidence notamment dans la référence [168]. L'efficacité de diffraction est donc approximée comme constante quel que soit l'angle d'incidence, dans les limites de validité du domaine scalaire.

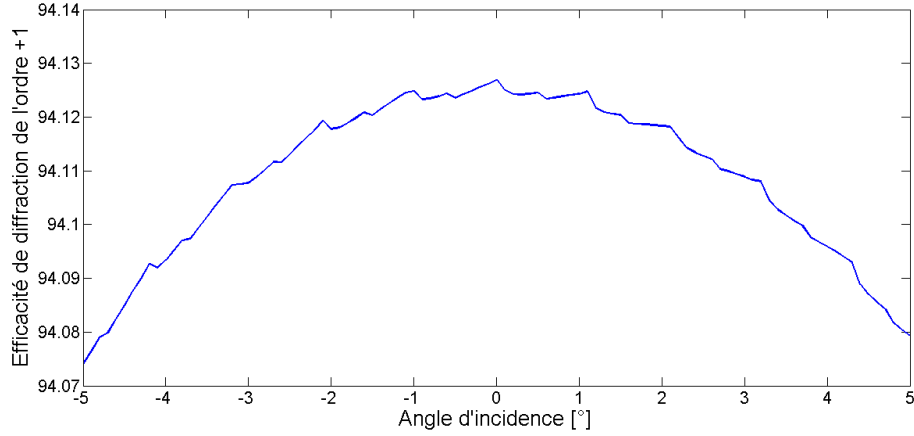


FIGURE C.3 – Simulation PC-Grate® : efficacité de diffraction du premier ordre de diffraction d'un réseau de diffraction de période $20\ \mu\text{m}$, en fonction de l'angle d'incidence (Matériau = BK7, angles de diffraction dans le matériau.)

C.3 Longueur d'onde maximale diffractée selon la période

Des exemples d'efficacité de diffraction aux ordres 0 et 1 d'un réseau blazé, pour différentes périodes, sont repris en Figure C.4. On observe la limitation en longueur d'onde pour les plus petites périodes, dues à l'angle de diffraction qui atteint les 90° , cf. Figure C.5.

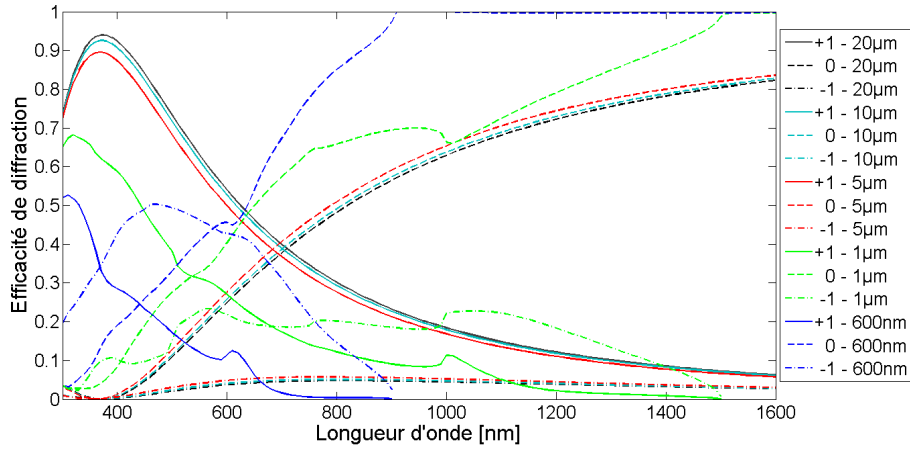


FIGURE C.4 – Simulation PC-Grate : Efficacité de diffraction des ordres -1 à +1 de réseaux de diffraction blazés de hauteur $700\ \text{nm}$, en fonction de leur période et de la longueur d'onde. (Matériau = BK7, efficacité de diffraction dans le matériau.)

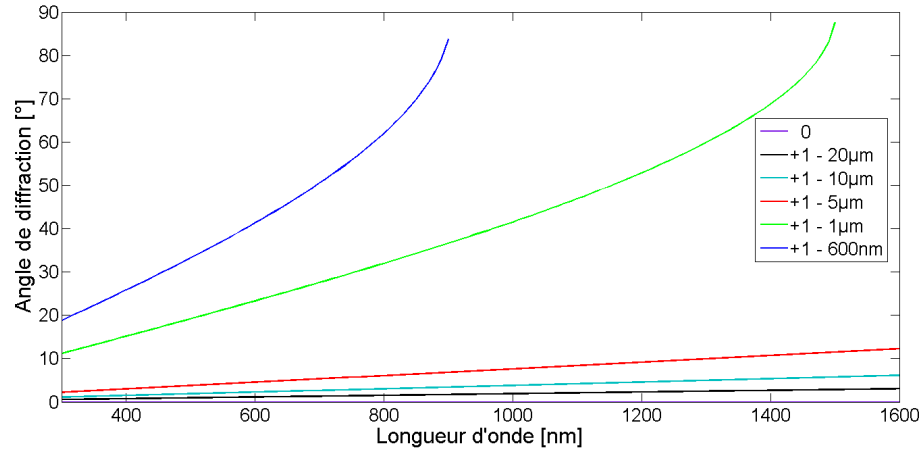


FIGURE C.5 – Simulation PC-Grate® : Angles de diffraction des ordres +1 de réseaux de diffraction blazés de hauteur 700 nm, en fonction de leur période et de la longueur d'onde. (Matériau = BK7, angles de diffraction dans le matériau.)

Annexe D Caractéristiques du panneau solaire

D.1 Panneau MESSENGER et adaptation à notre situation

La Figure D.1 décrit la configuration du panneau de MESSENGER : 2/3 de miroirs et 1/3 de cellules PV. La composition des différentes couches est reprise entièrement par la référence [169]. Dans notre situation, les éléments principaux de ce panneau ont été utilisés, à l'exception des miroirs qui ont été remplacés par de la peinture blanche comme expliqué en section 7.2. Les différents éléments composant notre panneau solaire, inspiré de celui de MESSENGER, sont repris dans la Table D.1. Cette table reprend aussi les propriétés thermiques utiles de chaque élément.

Notons que la peinture blanche choisie (S13GP:6N/L0-1) a été testée sur des panneaux composites, et montre une bonne tenue au cours du temps [170]. Ses propriétés d'émissivité ne se dégradent pas beaucoup, mais bien sûr son absorption augmente sous l'effet des UV (de moins de 0.2 à plus de 0.4). Cependant, dans notre cas, la lentille fera écran vis-à-vis de ces UV, ce qui réduira l'effet de jaunissement. Bien sûr, d'autres matériaux sont envisageables, selon les contraintes sur la température qui auront été fixées. On peut citer les miroirs (meilleurs au point de vue des propriétés thermiques, mais lourds), du kapton métallisé, ou autres.

D.2 Caractéristiques thermiques des éléments du panneau

Les caractéristiques thermiques des différents éléments composant le panneau sont reprises dans la Table D.1. Cependant, certains éléments sont complexes et non-uniformes, comme le CFRP et le nid d'abeille. Ces éléments nécessitent donc un calcul supplémentaire pour déterminer leurs propriétés thermiques globales selon leur composition exacte. Ces développements sont présentés dans les points suivants.

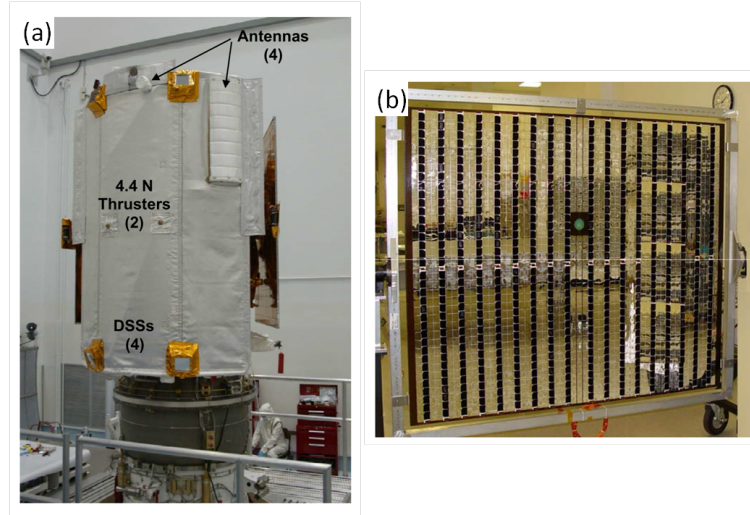


FIGURE D.1 – (a) Satellite MESSENGER deux semaines avant le lancement. Le panneau blanc est le « sunshade ». (b) Panneau solaire du MESSENGER avant son intégration [89], recouvert à 2/3 par des miroirs.

	$k[W/m.K]$	ϵ	α	Epaisseur
Lentille				
Silicone [171, 172]	0.146	0.8	Calcul Matlab	500 μm
Cellules PV				
Verre protecteur	/	0.84	/	/
Cellules [18]	55	/	$1-\eta$	150 μm
Colle	0.4	/	/	51 μm
Kapton [172]	0.155	/	/	51 μm
Panneau - demi-épaisseur				
Peinture blanche [87, 170]	/	0.82	0.2	/
CFRP	cf. section D.2	/	/	64 μm /couche (9 couches)
Colle	0.4	/	/	51 μm
Nid d'abeille	cf. section D.2	/	/	18 mm

TABLE D.1 – Caractéristiques importantes pour décrire thermiquement le panneau solaire. η est le rendement électrique de la cellule PV (qui prend en compte l'absorption de son verre protecteur), en fonction du flux qui lui est incident (calculé par Matlab). La succession des couches présentée dans la table est celle pour une demi-épaisseur de panneau (excepté le nid d'abeille qui fait 18 mm au total). La répartition précise des couches du panneau MESSENGER peut être trouvée en référence [169].

CFRP

Le CFRP est composé de deux matériaux : des fibres de carbone dans une matrice polymère, voir Figure D.2. Les méthodes de fabrication sont notamment reprises en référence [173], pour info. Afin d'éviter une simulation détaillée et complexe de la matrice de matériaux, on peut utiliser une approche équivalente en considérant les proportions des différents matériaux. L'ensemble a cependant des comportements différents selon l'axe parallèle aux fibres ou l'axe perpendiculaire.

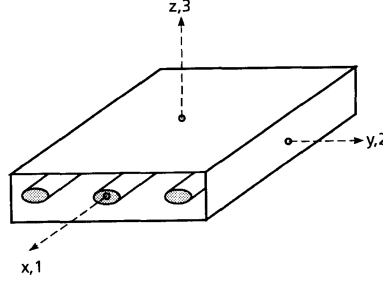


FIGURE D.2 – Couche de CFRP unidirectionnelle [174].

Parallèlement aux fibres Soit une proportion de fibres Φ . La conductivité effective dans la direction des fibres, selon l'axe x , est [175, 176, 177]

$$k_{\text{eff}} = k_0(1 - \Phi) + k_1\Phi \quad (\text{D.1})$$

où k_0 est la conductivité de la résine et k_1 est la conductivité des fibres.

Perpendiculairement aux fibres La conductivité effective peut être approximée par l'équation suivante [174], valable pour les directions y et z :

$$k_{\text{eff}} = k_0 + \frac{2\Phi k_0}{\left(\frac{k_1+k_0}{k_1-k_0}\right) - \Phi + \left(\frac{k_1-k_0}{k_1+k_0}\right) (0.30584\Phi^4 + 0.01363\Phi^8)} \quad (\text{D.2})$$

Les matériaux du panneau MESSENGER pour les fibres et la résine sont, respectivement, du K13C et de la résine RS-3 (fournisseur YLA, Inc.). Pour ces derniers, nous avons des conductivités respectivement de 620 et 0.3 W/m.K. La solution pour la combinaison des deux, selon les équations développées ci-dessus, donne pour 60% de fibres, une conductivité le long de la fibre d'environ 372 W/m.K, et dans le sens transverse 1.11 W/m.K.

Bicouches Un CFRP composé de deux couches conserve la même conductivité selon l'axe z , mais la conductivité dans le plan change selon l'équation (D.3) : elle est moyennée et donc identique dans les directions x et y .

$$k_{\text{facesheet}} = \frac{k_{\text{long}} + k_{\text{trans}}}{2} \quad (\text{D.3})$$

Multicouches Les conductivités parallèles et perpendiculaires moyennes d'un multi-couches composé de M couches, peuvent s'exprimer comme suit [178]. L'angle θ représente l'inclinaison de l'axe des fibres d'une couche par rapport aux autres couches. h_i est l'épaisseur de la couche i et h_{tot} est l'épaisseur totale du multi-couches, soit la somme des h_i .

$$k_{\parallel}^M = k_{\parallel} \cos^2 \theta + k_{\perp} \sin^2 \theta \quad (\text{D.4})$$

$$k_{\parallel \text{moyen}} = \sum_{i=1}^M k_{\parallel}^M \cdot \frac{h_i}{h_{\text{tot}}} \quad (\text{D.5})$$

$$k_{\perp}^M = k_{\perp} \cos^2 \theta + k_{\parallel} \sin^2 \theta \quad (\text{D.6})$$

$$k_{\perp \text{moyen}} = \sum_{i=1}^M k_{\perp}^M \cdot \frac{h_i}{h_{\text{tot}}} \quad (\text{D.7})$$

Dans le cas du panneau MESSENGER, on a 9 couches de CFRP, avec les axes également répartis entre 0 et 180°, les conductivités parallèles et perpendiculaires aux fibres sont donc identiques.

Nid d'abeilles

Le nid d'abeilles n'est pas un matériau plein, on doit donc trouver une expression équivalente pour la conductivité thermique volumique. Le matériau utilisé est l'alliage d'aluminium 5056 (réf : CRIII-1/4-5056-0.0007p). L'alliage Al 5056 possède une conductivité thermique d'environ 112 W/m.K. A partir de l'épaisseur des bandes (t) et de la taille des cellules du nid d'abeille (S), on peut calculer la conductivité thermique volumique équivalente (k) dans les différentes directions. La structure de ce type de nid d'abeille est illustrée en Figure D.3.

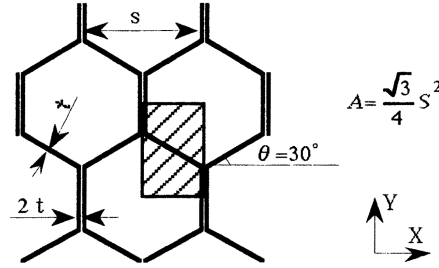


FIGURE D.3 – Configuration du nid d'abeille [179].

L'équation de la conductivité transverse (T), selon l'axe z , c.-à-d. d'un CFRP à l'autre, dans l'épaisseur du nid d'abeilles, est reprise dans l'équation (D.8) [179, 87]. Celle de la conductivité dans la direction des rubans (L), selon l'axe y , suit l'équation (D.9). Finalement, dans la direction perpendiculaire (W) à la direction des rubans, selon l'axe x , on a l'expression de l'équation (D.10).

$$k_{T \text{ équivalent}} = 8kt/3S \quad (\text{D.8})$$

$$k_{L \text{ équivalent}} = 3kt/2S \quad (\text{D.9})$$

$$k_{W \text{ équivalent}} = kt/S \quad (\text{D.10})$$

Pour le panneau MESSENGER, un exemple de résultat est repris dans la Table D.2. L'épaisseur du nid d'abeille dans le sens transverse est de 18 mm.

Epaisseur de la feuille [mm]	Taille d'une cellule [mm]	k_T [W/m.K]	k_L [W/m.K]	k_W [W/m.K]
0.0178	3.175	1.6725	0.9408	0.6272

TABLE D.2 – Caractéristiques du nid d'abeille du panneau MESSENGER.

Annexe E Description des liens thermiques

Un schéma thermique peut être mis en parallèle à un schéma électrique, respectant les lois d'Ohm, avec le flux de chaleur q équivalent au courant, et le ΔT correspondant à la différence de tension. Ainsi, les liens de conduction et radiatifs entre les noeuds décrivant le système sont représentés par des « résistances ». L'expression de ces liens et la méthode permettant de déterminer la température du système à l'équilibre thermique sont rappelées ci-dessous.

Liens conductifs

Les « résistances conductives » sont définies par l'équation (E.1), avec A la section couverte par le noeud [m^2], d la distance entre les deux noeuds reliés [m], et k le coefficient de conductivité thermique [W/m.K].

$$R_{\text{conduction}} = \frac{1}{GL} = \frac{1}{A} \cdot \frac{d}{k} [\text{K/W}] \quad (\text{E.1})$$

Tout comme dans le cadre des circuits électriques et de la loi d'Ohm, deux résistances en série s'additionnent, et deux résistances en parallèle suivent la loi $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$. On retrouve alors la loi de Fourier et l'expression du flux de chaleur :

$$q_{i,j} = \frac{1}{R} \cdot \Delta T = GL_{i,j}(T_i - T_j)$$

Les paramètres nécessaires pour décrire ces termes sont donc les coefficients de conductivité thermique, les épaisseurs des matériaux et les sections couvertes par chaque noeud.

Liens radiatifs

En ce qui concerne les liens radiatifs GR, c'est un peu plus compliqué. Les GR dépendent de l'émissivité du matériau, et de son facteur de vue avec l'autre noeud auquel il est relié. Le schéma en Figure E.1 décrit les expressions de ces liens radiatifs.

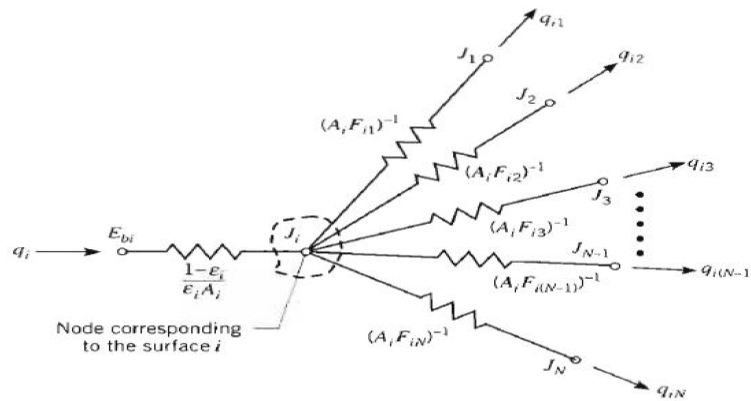


FIGURE E.1 – Principe pour le calcul des GR. Les détails sont décrits en référence [75].

On peut montrer, grâce à la loi de Stefan-Boltzmann, que

$$q_{i,j} = GR_{i,j} \cdot \sigma (T_i^4 - T_j^4)$$

avec la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,6 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4})$. Le calcul des facteurs de vue est assez complexe. Cette tâche est donc laissée à ESATAN[®], qui nous fournit les liens radiatifs pour une géométrie et des émissivités données.

Conditions limites

Les conditions d'entrées en termes de flux parvenant sur le système doivent être intégrées. Les flux absorbés par la lentille, le panneau et les cellules respectivement sont repris par les équations suivantes :

$$Q_{\text{lens}} = \int \text{AM0} \cdot S_{\text{lens}} \cdot \alpha_{\text{lens}} \partial \lambda \quad (\text{E.2})$$

$$Q_{\text{panel}} = \int F_{\text{inc panel}} \cdot S_{\text{section}} \cdot \alpha_{\text{panel}} \partial \lambda \quad (\text{E.3})$$

$$Q_{\text{cells}} = \int F_{\text{inc cells}} \cdot S_{\text{section}} \cdot (1 - \eta) \partial \lambda \quad (\text{E.4})$$

avec F qui est le flux parvenant sur chaque section du panneau ou cellules, calculé via nos programmes Matlab[®]. Etant donné que dans nos simulations le spectre n'est pas complet, et que nous ne prenons pas en compte l'entière des ordres de diffraction, il y a une faible partie de flux qui n'est pas considérée. Pour l'intégrer et vérifier notre bilan de flux, cette lumière « parasite » est arbitrairement considérée comme uniformément distribuée sur le panneau. Elle est alors absorbée selon les coefficients d'absorption, tandis que le reste est réfléchi vers la lentille et ainsi de suite. Cette partie réfléchie représente moins de 0.07% de différence avec les flux initiaux, elle est donc négligée dans nos calculs. Notons par ailleurs que l'énergie absorbée par les cellules est ici exagérée : nous considérons que tout ce qui n'est pas converti par la cellule est transformé en chaleur, considérant donc un anti-reflet idéal sur les cellules. En réalité, une partie de la lumière est réfléchie, réduisant un peu les résultats. Ceci serait à prendre en compte dans le cas d'une simulation plus précise avec des hypothèses fines sur les cellules PV utilisées.

Détermination des températures Le calcul final s'effectue selon l'hypothèse d'équilibre thermique, grâce à l'équation de conservation d'énergie ci-dessous. Cette équation permet alors de déterminer les températures au niveau de chaque noeud.

$$Q_i = \sum_j GR_{i,j} \sigma (T_j^4 - T_i^4) + \sum_j GL_{i,j} (T_j - T_i) \quad (\text{E.5})$$

Annexe F Superposition du réseau sur la face arrière

Pour de multiples raisons, il peut être avantageux de placer le réseau de diffraction sur la face arrière de l'élément optique, c.-à-d. sur la face de la lentille de Fresnel. Cette configuration permettrait en effet d'avoir une face plane à l'avant, ce qui facilite notamment la pose et la tenue d'un revêtement anti-UV ou autre traitement de surface nécessaire pour la viabilité de l'élément optique en environnement spatial. De plus, point de vue fabrication, la superposition des deux éléments structurés n'impliquerait plus qu'un unique moule au lieu de deux, évitant de plus les problèmes d'alignement entre eux. Le développement ci-dessous introduit la possibilité de réaliser cette superposition simplement en sommant les deux profils.

En Table F.1 sont repris les calculs d'angle de sortie pour un point donné de la lentille, selon que le réseau est superposé à la face avant ou arrière de l'élément optique. Etant donné les ordres de grandeurs de la différence entre le pas du réseau et la lentille, nous considérons localement que le réseau est superposé à une surface plane de pente correspondant à la pente locale de la lentille. Les développements sont réalisés pour une incidence nulle, pour les ordres 0 et 1. Pour une incidence non-nulle mais faible, les conclusions seront les mêmes.

	Réseau en face avant	Réseau en face arrière
Ordre 0	$n \cdot \sin(\alpha) = \sin(\beta)$	$\sin(\beta) = n \cdot \sin(\alpha)$
Ordre 1	$\sin(\beta_1) = n \cdot \sin(\alpha - \text{asin}(\frac{\lambda}{n \cdot \Lambda}))$ avec l'approximation des petits angles, considérant $\lambda/n \cdot \Lambda$ comme très petit, on obtient : $\sin(\beta_1) \approx n \cdot \sin(\alpha - \frac{\lambda}{n \cdot \Lambda})$ $= n \cdot [\sin(\alpha) \cos(\frac{\lambda}{n \cdot \Lambda}) - \cos(\alpha) \sin(\frac{\lambda}{n \cdot \Lambda})]$ $\approx n \cdot \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \Lambda}$	$\sin(\beta_1) = n \cdot \sin(\alpha) - \frac{\lambda}{n \cdot \Lambda'}$

TABLE F.1 – Avec l'approximation des petits angles pour $\lambda/n \cdot \Lambda \ll 1$, on obtient exactement les mêmes angles de sortie, pour autant que l'on pose la relation : $\Lambda' = \Lambda / \cos(\alpha)$. La seule différence réside dans les erreurs de l'approximation des petits angles (c.-à-d. pour les grandes longueurs d'onde et petites périodes). *Notation* : α est la pente locale de la face arrière, β et β_1 sont les angles de sortie aux ordres 0 et 1, par rapport à la normale à la pente locale, n est l'indice de réfraction du silicone, Λ (face avant) et Λ' (face arrière) sont les périodes des réseaux, mesurées le long de la face sur laquelle est posé le réseau.

Ainsi, selon l'approximation des petits angles, relativement correcte pour le rapport $\frac{\lambda}{n \cdot \Lambda}$ dans notre cas, les résultats pour une combinaison avec le réseau sur la face avant ou arrière sont les mêmes à condition que la période du réseau sur la face arrière corresponde à l'expression suivante

$$\Lambda' = \Lambda / \cos(\alpha)$$

Dans ce cas, les angles de sortie, pour les mêmes formes et configurations qu'avant, donneront le même résultat, aux erreurs d'approximation près. Les résultats avec un angle d'incidence non-nuls donnent les mêmes conclusions pour des angles relativement faibles.

Exemple d'erreur due à l'approximation des petits angles : pour une longueur d'onde maximale de 1100 nm à collecter à l'ordre 1, l'erreur maximale rencontrée s'élève à 0.052°, sur le côté le plus pentu de la lentille. Si cette option est choisie, les méthodes de design peuvent donc demeurer les mêmes, avec une légère adaptation éventuelle aux bords de l'optique pour réduire les effets de l'approximation.

Le réseau étant superposé à la forme de la lentille, et donc incliné, il voit une incidence égale à la pente locale de la lentille. Ainsi, pour réduire les pertes par ombrage dues à cette incidence, le profil peut être adapté : la face verticale devra être alignée avec les rayons incidents, et non en fonction de la normale à la surface de la lentille.

Annexe G Le profil idéal est blazé

L'idée est de maximiser la puissance diffractée dans un unique ordre de diffraction. Le reste étant si possible non-diffracté. Cette condition revient à n'avoir qu'un pic à l'ordre 1 dans l'espace de Fourier. Dans ce cas, il faut que le déphasage soit la somme d'un sinus et d'un cosinus :

$$\sin(x) = \frac{e^{i.x} - e^{-i.x}}{2i} \quad (\text{G.1})$$

$$\cos(x) = \frac{e^{i.x} + e^{-i.x}}{2i} \quad (\text{G.2})$$

$$\text{donc} \quad (\text{G.3})$$

$$(\text{déphasage}) \sim \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \delta n . h(x)) \propto \exp(i . A . x) \sim \sin + \cos \quad (\text{G.4})$$

$$\text{donc} \quad (\text{G.5})$$

$$h(x) \propto x \quad (\text{G.6})$$

Or $h(x) = B.x$ correspond à la définition d'un réseau blazé. Ce réseau est donc le meilleur pour maximiser un ordre de diffraction en particulier.

Annexe H Développement de la configuration avec un réseau à faible période

En section 9.1, une solution alternative a été proposée, pour éviter les pertes par diffraction dans les ordres supérieurs : l'utilisation d'un réseau à très faible période, ne possédant quasiment que deux ordres en transmission, les ordres 0 et -1. Cependant, les angles de diffraction sont très élevés, et la configuration précédente basée sur une lentille combinée à un réseau ne permet pas de suffisamment focaliser la lumière (voir section 10.3.1). Une autre approche a donc été proposée, pour l'exercice parce qu'elle induit de la complexité et de la masse supplémentaires.

Le principe est d'utiliser un réseau de faible période avec une incidence telle que la majorité de l'énergie transmise est diffractée dans les ordres 0 et -1. Pour notre exemple, cet angle vaut environ 30°. En section 10.3.1 (a), nous avons déterminé la période minimale permise en fonction du spectre que l'on voulait conserver à l'ordre 1. Cette période se situe autour de 920 nm pour conserver les longueurs d'onde sous 900 nm, à incidence nulle. Seulement ici, nous avons une incidence autour de 30°, ce qui modifie la période limite : la période minimale se situe maintenant autour de 500 nm.

Ainsi, selon l'équation de la diffraction (équ. (4.4)), pour 30° d'incidence et une période de 500 nm, on observe un angle d'environ 20° entre les ordres 0 et -1 (donc sans lumière), avec un étalement angulaire de l'ordre -1 de près de 90° (pour des longueurs d'onde entre 400 et 900 nm). Ceci illustre bien à la fois la possibilité de dissociation des ordres 0 et -1 grâce à l'intervalle libre, mais aussi l'impossibilité pour une simple lentille de Fresnel, de focaliser ces deux ordres de diffraction de façon satisfaisante. Une illustration est donnée en Figure H.1(a).

Pour s'approcher de l'incidence de 30° et focaliser le faisceau, les solutions sont multiples en fonction du nombre d'éléments optiques que l'on se permet d'ajouter. Si l'on se

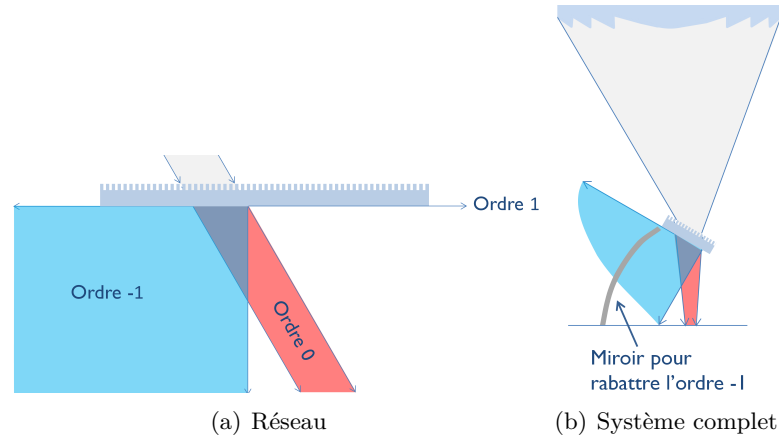


FIGURE H.1 – (a) Illustration de la diffraction au travers du réseau à faible période. La majorité de l'énergie est transmise dans les ordres 0 et -1. (b) Illustration du système complet, comprenant la lentille de Fresnel, le réseau, et un miroir (par exemple) pour rabattre l'ordre -1. Les schémas ne sont pas à l'échelle.

focalise sur maximum deux éléments, on peut placer le réseau proche du plan focal de la lentille, cette dernière focalisant la lumière incidente sur le réseau (voir schéma en Figure H.1(b)).

Mais alors, le réseau voit une large gamme d'angles d'incidence, déterminés par le cône de focalisation de la lentille. Or pour les réseaux à faibles périodes, l'efficacité de diffraction est fortement sensible à l'angle d'incidence. Nous ne pouvons donc pas, comme en section 9.3 pour les configurations à grandes périodes, faire un calcul théorique idéal avec les courbes d'efficacité telles quelles.

Pour avoir une idée de résultat, une moyenne sur les angles potentiellement reçus sur le réseau a été effectuée (entre 20 et 40° par rapport à sa normale), avec une lentille optimisée pour l'ordre 0, de $F\#$ 3. En faisant la moyenne des efficacités de diffraction pour chaque angle, on obtient la courbe en Figure H.2, déjà moins intéressante en termes de séparation spectrale qu'à incidence unique. De plus, la duplication des surfaces optiques et les grands angles d'incidence et de diffraction induisent de large pertes optiques par réflexion. En prenant en compte à la fois les pertes optiques supplémentaires et la dégradation de la séparation spectrale due au large intervalle d'angles d'incidence, nous obtenons des valeurs de puissance électrique idéale inférieures à celles des configurations blazée et lamellaire (349 W/m² contre près de 365 W/m² pour les autres configurations). Néanmoins, la séparation spectrale en elle-même est assez bonne, et moyennant des solutions d'anti-reflet pour les surfaces optiques, il est peut-être possible d'arriver à de meilleurs résultats.

Le problème des grands angles de diffraction, même proches du plan focal, est qu'ils donnent de larges taches focales. Pour le corriger, on a ajouté par exemple un miroir comme en Figure H.1(b). Mais le tout pourrait être fait d'une pièce comme un concentrateur secondaire réfractif couplé à un réseau, ou faire intervenir un autre élément optique avant... Un exemple de configuration et de simulation ASAP[®] est repris en Figure H.3. Cette simulation montre que la séparation spatiale est faisable. Peut-être avec plus d'optimisation, pourrait-on arriver à des taux de concentration et une efficacité corrects.

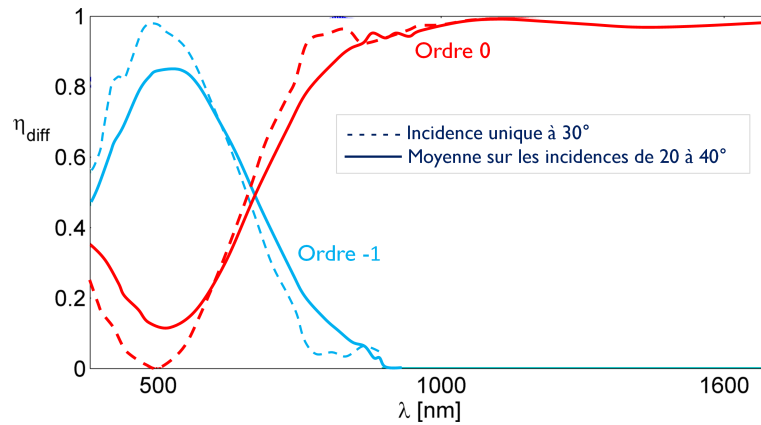


FIGURE H.2 – Efficacités de diffraction des ordres 0 et 1 transmis au travers d’un réseau lamellaire de 500 nm de période. Les lignes pleines correspondent à la moyenne sur les angles d’incidence, tandis que les pointillés décrivent le cas à 30° d’incidence. Les courbes en rouge/bleu clair/bleu foncé représentent la lumière non-diffractée/l’ordre -1/la somme des ordres 0 et 1 pour chaque cas.

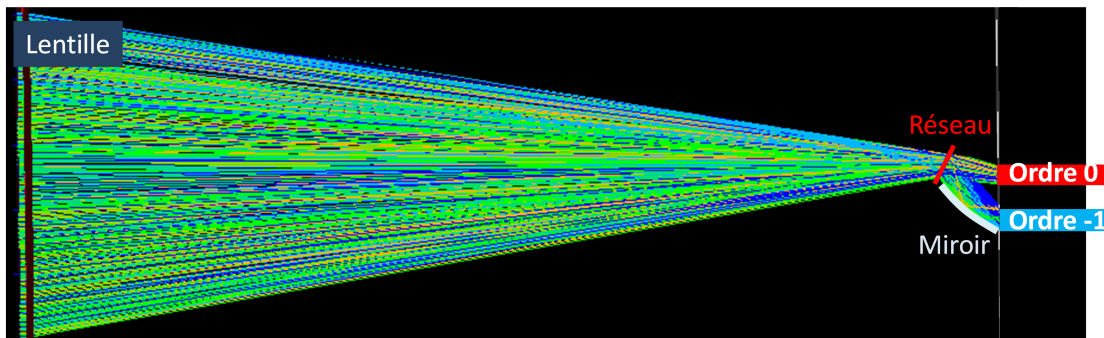


FIGURE H.3 – Schéma des rayons tracés dans la simulation ASAP® : on observe que la séparation spatiale entre les ordres 0 et -1 est faisable.

Annexe I Le raytracing et les principes de modélisations utilisés

I.1 Modélisation du soleil en 2D

La lumière du soleil nous parvient selon un cône dont le demi-angle d’ouverture vaut $\theta_{\text{sun}} = 0,26^\circ$. En 3D, l’image du soleil par une lentille circulaire parfaite est un cercle d’intensité uniforme, de rayon $f_{\text{eff}} \cdot \tan(\theta_{\text{sun}})$. Par contre, nous travaillons ici avec une lentille cylindrique, et donc en 2D. La transition du modèle 3D vers le 2D n’est pas directe, car exposée au soleil, une lentille cylindrique ne donne plus une image d’intensité constante et uniforme ! Le résultat est ici celui de la somme des cercles issus de chaque section de la lentille dans le sens cylindrique : l’intensité au centre est donc plus grande que sur les bords. Pour simuler cela en Matlab®, chaque rayon dans un plan vertical 2D se voit attribuer un « poids » selon le principe décrit en Figure I.1 : cela revient en quelque sorte à « comprimer » le cercle du soleil sur une ligne.

On prend ainsi en compte la « somme de cercles », et la distribution non-uniforme

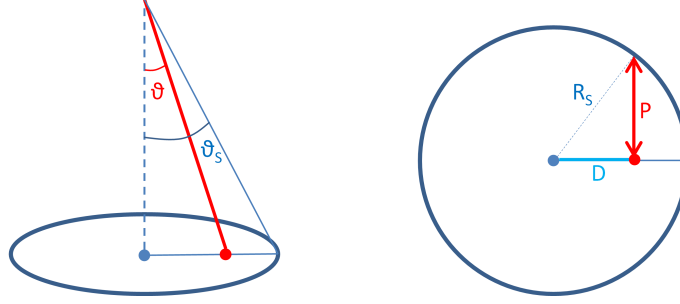


FIGURE I.1 – Schémas pour l’attribution du poids à un angle d’incidence. Soit un angle d’incidence θ inférieur à la divergence du soleil θ_{sun} . La divergence maximale du soleil définit un cercle d’intensité uniforme, de rayon $R_S = f_{\text{eff}} \cdot \tan(\theta_{\text{sun}})$. Dans le cas cylindrique, tout angle inférieur à la divergence se voit attribuer un poids différent. Dans le cas du schéma, l’angle θ définit le point rouge sur la ligne 2D de simulation. Son poids correspond alors à la distance P . Soit $D = f_{\text{eff}} \cdot \tan(\theta)$, le poids correspond alors à $2P = 2\sqrt{R_S^2 - D^2}$. Ceci à pondérer selon le nombre d’angles considérés entre 0 et $\pm\theta_{\text{sun}}$.

dans un plan 2D. De cette façon, les résultats concordent très bien avec ceux réalisés via ASAP[®] (dans lequel les modèles sont par défaut simulés en 3D).

Dans ASAP[®], le problème était différent : il fallait simplifier les calculs de sorte à minimiser le nombre de faisceaux envoyés et donc le temps de calcul. Nous avons donc aussi travaillé en 2D, à partir d’une ligne de sources émettrices, à la place d’une surface égale à celle de la lentille pour le cas 3D : on obtient donc dans le plan focal de la lentille cylindrique, un cercle. Comme pour la méthode décrite en Figure I.1, ce cercle doit alors être « comprimé » sur notre ligne de simulation 2D pour correspondre à une lentille cylindrique. Ceci est ici fait en ne plaçant qu’un unique pixel dans le sens cylindrique, ce qui intègre directement le poids de chaque direction et de chaque position, simulant la somme de tous les cercles dans le cas réel. Ceci est décrit en Figure I.2.

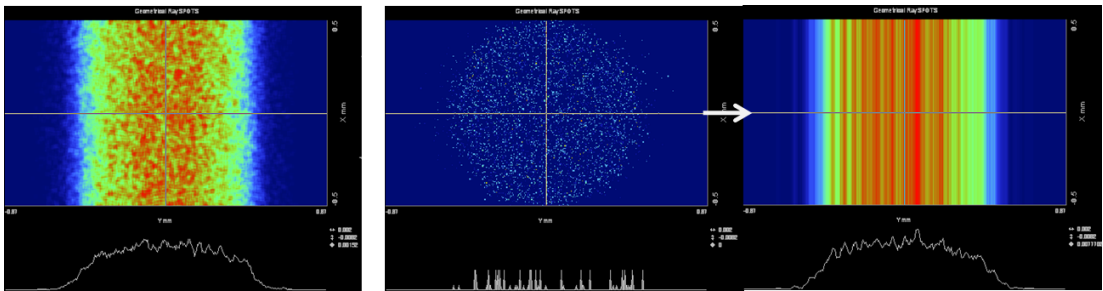


FIGURE I.2 – A gauche : Résultat dans le plan focal d’une lentille cylindrique, sous le soleil. A droite : méthode de simulation plus rapide - on ne simule qu’une ligne de sources lumineuses donnant un cercle dans le plan focal. En ne plaçant qu’un pixel dans le sens cylindrique, on obtient le même résultat que sur l’image de gauche.

I.2 Prise en compte de l'ombrage des dents de la lentille

Le phénomène d'ombrage a déjà été abordé en section 4.1.1. Il est rappelé en Figure I.3.

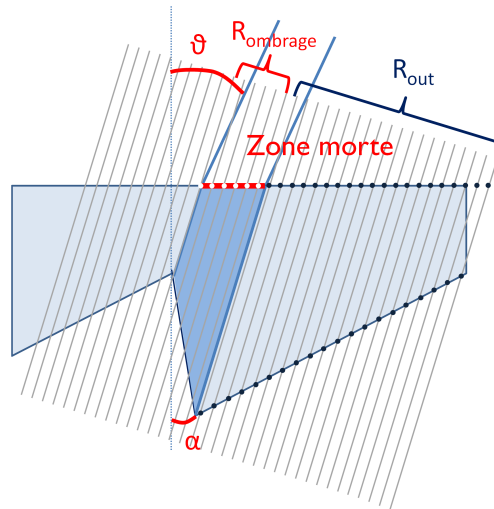


FIGURE I.3 – Pertes optiques par ombrage pour une incidence non-nulle, et un angle de dépouille α .

Comme expliqué en section 10.2, dans nos simulations, les rayons sont envoyés depuis la face inférieure de la lentille directement, prenant comme paramètres la pente locale, la position de départ et l'angle d'incidence (provenant du réseau de diffraction). Ainsi, les rayons perdus par ombrage ne sont pas tracés, et donc a priori pas pris en compte. Pour remédier à ce problème de simulation, nous avons donc introduit ces pertes dans le bilan global en ajoutant au nombre de rayons total ceux qui auraient dû couvrir la zone morte. La méthode est la suivante :

Soit θ l'angle d'incidence à l'interface matériau lentille - air par rapport à la verticale, venant de la lentille ; α l'angle de dépouille ; min_G et min_{DR} les nombres respectivement de minima sur les parties à gauche et à droite de l'apex de la lentille ; et h la hauteur des dents. Le nombre de rayons quittant au total la surface de la lentille est fixe et vaut R_{out} , avec une distance les séparant égale à PAS (dans un vecteur purement horizontal). Ce sont ces rayons qui sont propagés par notre méthode de simulation. Le nombre total de faisceaux incidents (R_{tot}) par contre, varie selon l'angle d'incidence et l'angle de dépouille : il intègre en plus de R_{out} , les rayons perdus par ombrage.

De façon générale, le nombre total de rayons incidents suit l'expression (I.2). Cependant, selon l'angle d'incidence et l'angle de dépouille, certains termes tombent. Par exemple, si $\theta \geq \alpha$, il n'y a pas d'ombrage pour la partie droite de la lentille, et ainsi de suite. Par ailleurs, pour être exact, le PAS' à prendre en compte dépend de l'angle d'incidence. Cependant, étant donné les très faibles différences de hauteur entre les points discrétisant la forme de la lentille, la différence entre le PAS initial et celui reporté sur la face avant avec l'angle d'incidence (PAS') est très faible. Ainsi, la différence de pas donne lieu à des modifications inférieures à 4/10000 au niveau du nombre de rayons total, soit du même ordre pour la puissance de sortie, ce qui est donc bien négligeable.

$$R_{\text{ombrage}} = \min_G.h. \frac{\tan(\alpha) + \tan(\theta)}{\text{PAS}'} + \min_{DR}.h. \frac{\tan(\alpha) - \tan(\theta)}{\text{PAS}'} \quad (\text{I.1})$$

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{out}} + R_{\text{ombrage}} \quad (\text{I.2})$$

La somme des rayons parvenant dans le plan focal doit donc être pondérée par R_{tot} , et non par le nombre de rayons propagés (R_{out}).

I.3 Vérification des programmes Matlab®

Tous les programmes de tracés de rayons implémentés dans Matlab® ont été vérifiés avec le programme professionnel ASAP®[105]. Les données d'entrée sont le profil de la lentille optimisée par Matlab®, les caractéristiques du réseau (période et équation pour l'efficacité de diffraction), et l'indice de réfraction du silicone. L'implémentation dans ASAP® est assez complexe, consomme beaucoup de temps, et n'est pas propice aux optimisations. Ceci justifie son emploi uniquement pour les vérifications des programmes Matlab®, ce dernier est utilisé par contre pour tout le reste. Les vérifications incluent les réflexions de Fresnel, la divergence du soleil, des configurations à incidence non-nulle, des profils comprenant des angles de dépouille, etc. Les configurations avec concentrateurs secondaires ont aussi été vérifiées. Un exemple de vérification est illustré en Figure I.4. Tous les résultats Matlab® concordent quasiment parfaitement avec ceux d'ASAP®.

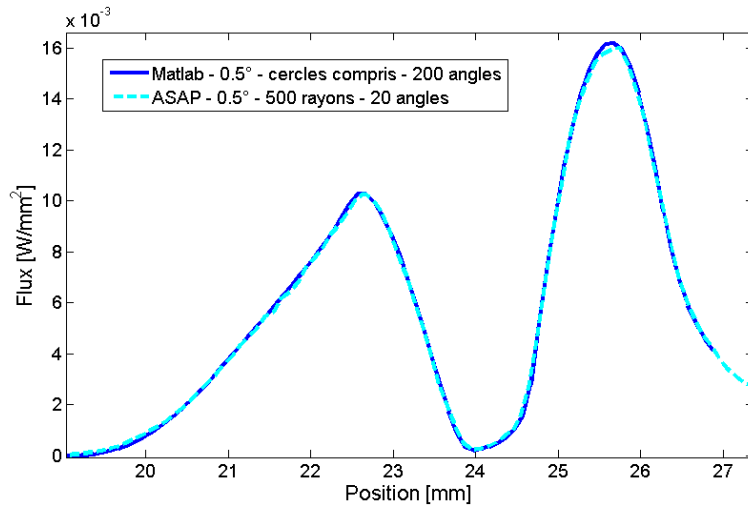


FIGURE I.4 – Flux d'énergie [W/mm^2] dans le plan focal selon la position, calcul via Matlab® et via ASAP® pour la même lentille, prise en compte des réflexions de Fresnel, des efficacités de diffraction selon la théorie scalaire et de la distribution de corps noir du soleil. Paramètres : angle d'incidence de 0.5° , $F\# = 3$, plan de collection en $z = 0$, rayon = 25 mm, lentille optimisée pour focaliser l'ordre 1 à 24 mm du centre, gamme de longueurs d'onde prise en compte [300 : 20 : 1600] nm, hauteur des dents de 0,15 mm, pixel de 0.1 mm de côté, période de diffraction de 34 μm .

Notons que pour chaque programme de simulation, une étude de convergence sur le nombre de rayons minimum à utiliser a été réalisée. La seule différence observable provient de la discrétisation de la forme de la lentille dans le programme ASAP®. Ainsi, les rayons atteignant ces points n'ont pas de pente bien définie et sont réfractés au hasard. Pour

réduire ce soucis, la discrétisation doit être réduite au strict minimum pour conserver une bonne représentation de la lentille. Dans le cas d'une lentille fresnelisée, cette discrétisation entraîne aussi un angle de dépouille supplémentaire par rapport à nos simulations Matlab[®], qui doit donc aussi être pris en compte.

I.4 Design du profil de la lentille

Le programme de design de la lentille permet de déterminer son profil idéal selon la hauteur des dents désirée, le $F\#$ voulu, le rayon, la période du réseau de diffraction, l'ordre de diffraction optimisé, la longueur d'onde focalisée à cet ordre, l'indice de réfraction du matériau, et la position souhaitée du foyer.

Cette forme est réalisée à partir du centre optique de la lentille (apex). L'ordre de diffraction focalisé est l'ordre 1 \rightarrow la position en x du centre optique de la lentille vaut : $x = x_{\text{foyer}} - f_{\text{eff}} \tan(\theta_1)$ avec θ_1 qui est l'angle de diffraction de l'ordre 1 à la longueur d'onde considérée (dépendant de l'angle d'incidence également).

En partant de ce centre optique, on calcule alors pour chaque point et chaque longueur d'onde extrême, la pente et les coordonnées correspondantes nécessaires pour que le rayon incident atteigne le foyer. Lorsque la hauteur nécessaire est supérieure à celle souhaitée des dents, ou inférieure à zéro, le profil est décalé de la hauteur des dents, fresnelisant la lentille. La forme finale est la moyenne de celles trouvées pour les deux longueurs d'onde extrêmes à focaliser. La méthode est décrite plus en détails ci-dessous, ainsi que par la Figure I.5.

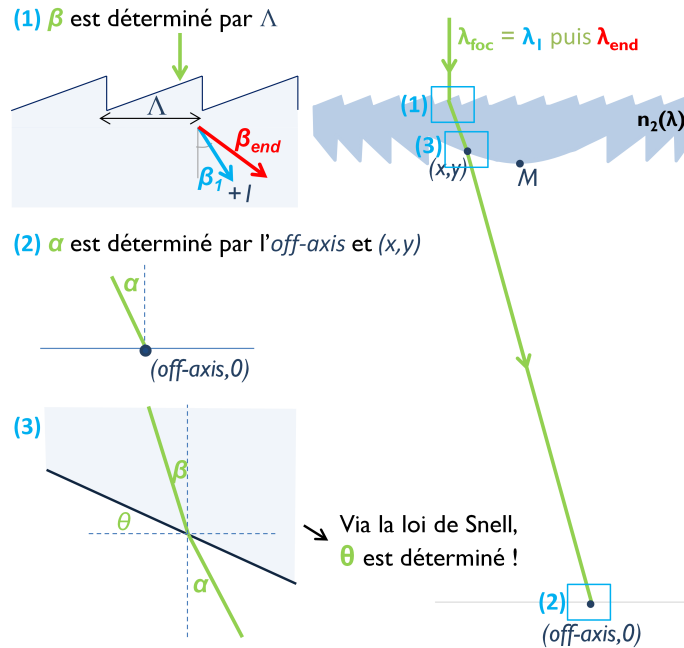


FIGURE I.5 – Méthode de calcul de la pente locale optimale de la lentille de sorte à parfaitement focaliser un rayon de longueur d'onde λ_{foc} diffracté à l'ordre 1, vers un point de coordonnées $(\text{off-axis}, 0)$, en fonction de la période du réseau de diffraction Δ et du $F\#$ de la lentille. $n_2(\lambda)$ est l'indice de réfraction du matériau dans lequel est réalisé l'élément optique.

Méthode

(1) Définition de la pente en tout point de la lentille : Pour focaliser parfaitement une longueur d'onde λ , l'angle de la lentille avec l'horizontale θ doit respecter les deux équations suivantes, avec F le point focal de la lentille et β l'angle de diffraction de la longueur d'onde λ au premier ordre de diffraction.

$$y = \frac{1}{\tan(\alpha)}(x - F) \quad (\text{I.3})$$

$$\alpha = -\theta - \text{asin} \left(\frac{n(\lambda)}{n_{\text{air}}} \sin \left(\text{asin} \left(\frac{\sin(\beta(\lambda))}{n(\lambda)} \right) - \theta \right) \right) \quad (\text{I.4})$$

La première équation (I.3) décrit la droite passant par le foyer F et d'inclinaison de pente par rapport à la verticale α . La seconde équation (I.4) fait référence à l'angle de sortie après diffraction par le réseau et passage de la lentille à l'air. On obtient donc la pente de la lentille θ en tout point en fonction de la position (x, y) , du foyer F et de la longueur d'onde λ à focaliser à l'ordre de diffraction considéré (1 ici).

(2) Définition des coordonnées des points formant la lentille : En tout point, la pente idéale est connue, soit la dérivée de la fonction à découvrir (la forme de la lentille), cf. explication ci-dessus.

On connaît donc $k_1 = f(X_i, U_i, \lambda_{\text{foc}}, m_{\text{diff}}, \Lambda, n_{\text{air}}, n_{\text{silicone}})$ = dérivée de la fonction U à trouver, ainsi que le point de départ (centre de la lentille, défini en début de section). Les méthodes ci-dessous permettent, sur base d'un point de départ et de la dérivée d'une fonction, de retrouver une approximation de celle-ci [180].

Euler explicite La méthode d'Euler explicite (Runge-Kutta d'ordre 1) permet de déterminer les différents points de la fonction U , via l'expression suivante, avec h qui est le pas de discrétisation :

$$U_{i+1} = U_i + h.k_1 \quad (\text{I.5})$$

Heun Cependant, la méthode d'Euler explicite donne lieu à des erreurs, d'autant plus petites que le pas h diminue, mais malgré tout non-nulles. De sorte à les minimiser et permettre l'utilisation d'un pas h plus grand pour un meilleur résultat, on peut travailler selon la méthode de Heun (Runge-Kutta d'ordre 2). On écrit alors :

$$U_{i+1} = U_i + h(w_1.k_1 + w_2.k_2) \quad (\text{I.6})$$

avec $k_1 = f(X_i, U_i)$ la dérivée au point i ; $k_2 = f(X_i + \alpha h, U_i + \beta h k_1)$ la dérivée au point P_2 , première approximation du point $i + 1$; w_1 ou w_2 le poids accordé à chaque pente, α et β deux paramètres. Le choix particulier, minimisant les erreurs, de $w_1 = w_2 = 0.5$ et $\alpha = \beta = 1$ définit la méthode de Heun.

Annexe J Période variable

J.1 Design d'une lentille focalisant l'ordre 0

Le principe de design de la lentille pour concentrer la lumière de l'ordre 0 est le suivant, aussi décrit en Figure J.1 :

1. On fixe le $F\#$, le point de focalisation (entre les points A et B), et les longueurs d'onde extrêmes à focaliser.
2. On définit, pour les deux longueurs d'onde extrêmes, quelles doivent être les focales (f_1 et f_2) telles que le point de largeur minimale soit dans le plan nul (croisement en X_1 et X_2).

Soit l'angle α défini comme suit :

$$\cos(\alpha) = \frac{f_{\text{eff}}}{\sqrt{F^2 + f_{\text{eff}}^2}}$$

On utilise la relation bien connue des lentilles :

$$(n_1 - 1) \cdot f_1 = (n_2 - 1) \cdot f_2$$

Soit pour la droite bleue (avec f_1), et idem pour la droite rouge (avec f_2) :

$$Y_{b/r} = f_{\text{eff}} - f_{1/2} \cdot \cos(\alpha)$$

$$X_{b/r} = \sin(\alpha) \cdot f_{1/2}$$

Les deux droites passant par X_1 ont les équations suivantes :

$$y - f_{\text{eff}} = \frac{f_{\text{eff}} - Y_b}{-R - X_b} \cdot (x + R)$$

$$y - f_{\text{eff}} = \frac{f_{\text{eff}} - Y_r}{R - X_r} \cdot (x - R)$$

En $y = 0$, les deux équations doivent donner $x = X_1$. En égalant les deux équations en $y = 0$, on trouve l'expression de f_1 :

$$f_1 = \frac{f_{\text{eff}} \cdot (n_1 - 2 + n_2)}{2 \cos(\alpha) \cdot (n_1 - 1)}$$

3. On connaît la focale passant par le point F :

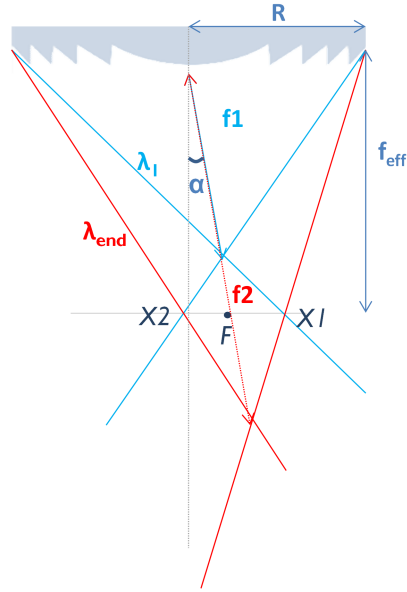
$$f_3 = \sqrt{F^2 + f_{\text{eff}}^2}$$

4. On détermine alors à quelle longueur d'onde correspond la focale f_3 . Cette longueur d'onde remplit la condition suivante, l'indice de réfraction n_3 variant avec la longueur d'onde :

$$n_3 = \frac{(n_1 - 1) \cdot f_1}{f_3} + 1$$

5. On estime finalement en tout point de la lentille la moyenne des pentes nécessaires pour faire converger cette longueur d'onde vers les points de focalisation A et B désirés, selon le principe de l'optique non-imageante, c.-à-d. pour les angles d'incidence minimaux et maximaux potentiellement rencontrés.

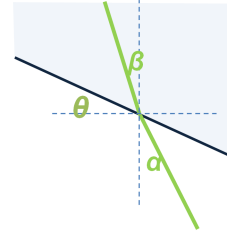
1) λ_{foc} est déterminé comme suit :



Principe du design
de Leutz
par optique non-imageante

2) α est déterminé par A , B et (x, y)

3)



→ A partir de la loi de Snell,
 θ est déterminé!

4) Le θ optimal est la moyenne de θ_1 et θ_{end}

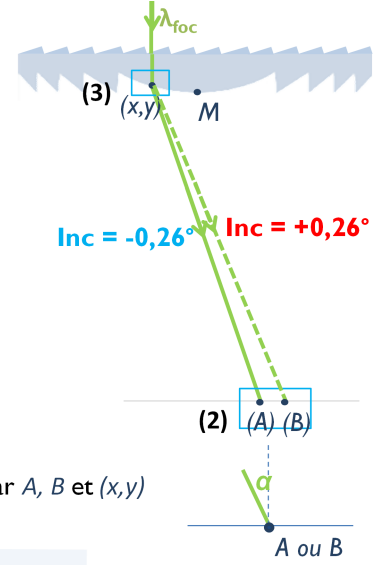


FIGURE J.1 – Méthode de design d'une lentille focalisant l'ordre 0.

J.2 Vérification de l'hypothèse d'épaisseur nulle et intégration d'une période variable dans le modèle ASAP®

Pour la simulation Matlab®, l'épaisseur de la lentille a été négligée, et la période variable optimale a été calculée pour chaque point de la face arrière de la lentille de Fresnel. En réalité, la période est définie sur la face avant, et donc ce qui arrive en un point i de la lentille ne correspond pas tout à fait à la période calculée correspondante.

Pour vérifier l'hypothèse, j'ai d'abord calculé le vecteur des périodes optimales sur la face avant de la lentille, pour une longueur d'onde fixée. Le but était de comparer ce vecteur avec le vecteur initial sur la face arrière. Selon l'épaisseur, ce vecteur peut se déplacer vers la gauche, mais les différences sont très faibles pour des épaisseurs inférieures à 1 mm. Par contre, cet effet peut s'amplifier avec l'angle de diffraction, et donc principalement avec les ordres de diffraction supérieurs. Les tests avec 1 mm d'épaisseur et l'ordre -1 par exemple, montrent de légères différences de forme. Cependant, de l'ordre -1 à l'ordre 2, les différences sont considérées comme négligeables.

Le deuxième problème est que cette hypothèse est a priori correcte à une longueur d'onde donnée, mais qu'en est-il sur toute la largeur spectrale (les angles de diffraction étant différents selon la longueur d'onde)? Dans Matlab®, j'ai donc introduit un vecteur période dépendant de chaque longueur d'onde. Dans les limites de variations de période de nos configurations, les résultats dans le plan focal restent encore une fois quasiment les

mêmes. Mais pour s'assurer de la justesse des simulations Matlab[®], une vérification avec le programme ASAP[®] a été réalisée.

La simulation ASAP[®] décrit ici un réseau placé sur la face avant de la lentille, avec la variation de période optimale calculée par Matlab. Pour ce faire, la fonction de variation de période de Matlab[®] a été transposée en « grating line function » (f/f'), en passant par la fonction de déphasage Φ [181].

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot f_1 \quad (\text{J.1})$$

$$\frac{f}{f'} = \frac{\Phi}{2\pi} \quad (\text{J.2})$$

avec i décrivant l'évolution de la période (pour chaque position y , correspond une période i , qui est la même sur la distance d'une période). Or

$$f_1(y) = h((i-1) - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} \Lambda_j}{\Lambda_i}) + \frac{h}{\Lambda_i} y \quad (\text{J.3})$$

$$h = \frac{\lambda}{\Delta n} \quad (\text{J.4})$$

donc

$$\frac{f}{f'} = \frac{f_1(y)}{h} \quad (\text{J.5})$$

La « grating line function » introduite dans ASAP[®] décrit donc notre réseau de diffraction à période variable.

Le profil de la lentille est donné à ASAP[®] via un fichier de points. La courbe étant discrétisée, naturellement un angle de dépouille égal à $\text{atan}(p_{\text{discrétisation}}/h_{\text{dents}})$ est introduit dans la simulation ASAP[®]. Cet angle a donc été ajouté dans nos simulations Matlab[®]. On obtient alors des résultats très proches entre les deux méthodes de simulation (voir Figure J.2). Evidemment, les simulations ASAP[®] sont un compromis entre le nombre de rayons, le pas de discrétisation (posant problème s'il est trop grand, car les rayons atteignant un coin ont une direction indéterminée), etc. Néanmoins, la proximité des résultats suggère que les simulations Matlab[®] sont plausibles et que l'hypothèse de départ est valable.

Afin de supprimer l'effet de discrétisation de la forme de la lentille dans ASAP[®], j'ai choisi de comparer les résultats pour une lentille de forme analytique (une parabole). Les résultats pour la même forme parabolique, et la période variable calculée dans Matlab[®], sont repris dans les Figures J.3, J.4 et J.5, pour différentes longueurs d'onde et ordres de diffraction : les résultats sont quasiment identiques, ce qui valide la simulation Matlab[®]. Les hypothèses de Matlab[®] ont été testées, notamment en adaptant le vecteur période à chaque longueur d'onde et chaque ordre de diffraction. Les plus grandes différences arrivent dans les ordres supérieurs, qui sont faibles en terme de puissance, et qui n'atteignent quasiment pas les cellules PV. Ainsi, le calcul de puissance de sortie avec Matlab[®], avec les hypothèses ou en prenant en compte l'épaisseur de la lentille, donne le même résultat à 0.003 W/m² près. Les simulations Matlab[®] intégrant l'hypothèse d'épaisseur nulle sont donc suffisantes.

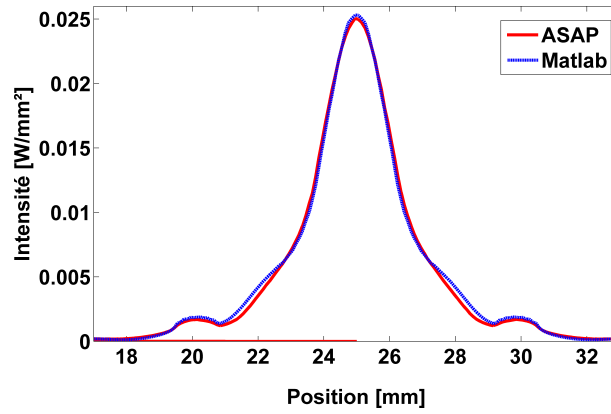


FIGURE J.2 – Puissance parvenant sur le détecteur pour les longueurs d’onde comprises entre 300 et 1100 nm. La forme dans ASAP[®] est discrétisée en 500 points, donnant lieu à un angle de dépouille d’environ 18.43° , pris en compte dans Matlab[®].

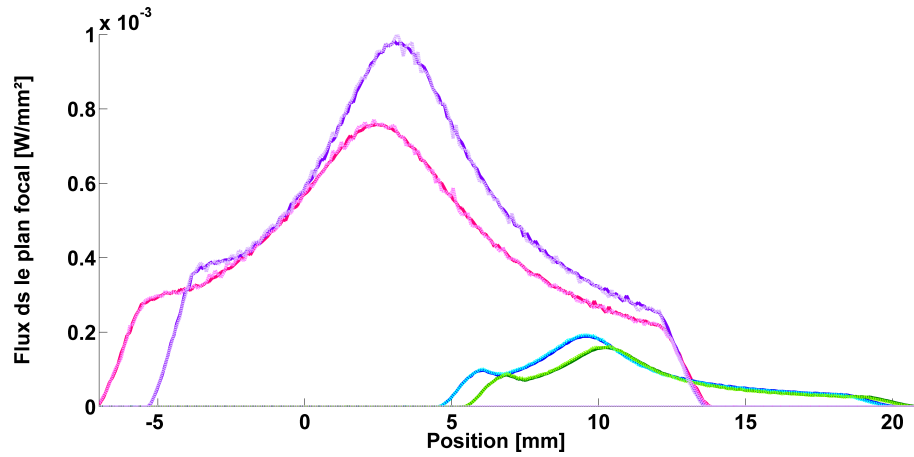


FIGURE J.3 – Puissance parvenant sur le détecteur pour les longueurs d’onde 400 (fuschia), 500 (mauve), 1500 (bleu) et 1600 nm (vert). La forme parabolique de la lentille est entrée sous forme de fonction dans ASAP[®] (30 000 rayons). Ordre de diffraction étudié : 1. Les courbes pleines correspondent à la simulation Matlab[®], tandis que les courbes claires, pointillées et bruitées correspondent à la simulation ASAP[®].

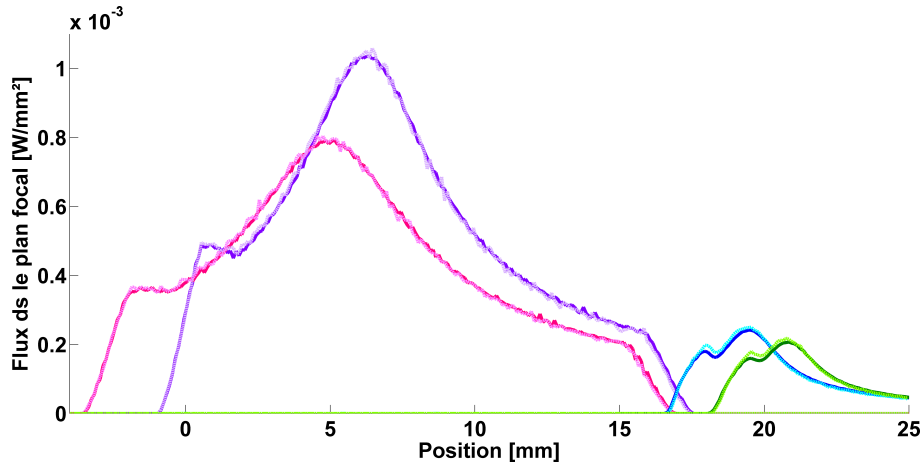


FIGURE J.4 – Puissance parvenant sur le détecteur pour les longueurs d’onde 400 (fuschia), 500 (mauve), 1500 (bleu) et 1600 nm (vert). La forme parabolique de la lentille est entrée sous forme de fonction dans ASAP[®]. Ordre de diffraction étudié : 2. Les courbes pleines correspondent à la simulation Matlab[®], tandis que les courbes claires, pointillées et bruitées correspondent à la simulation ASAP[®].

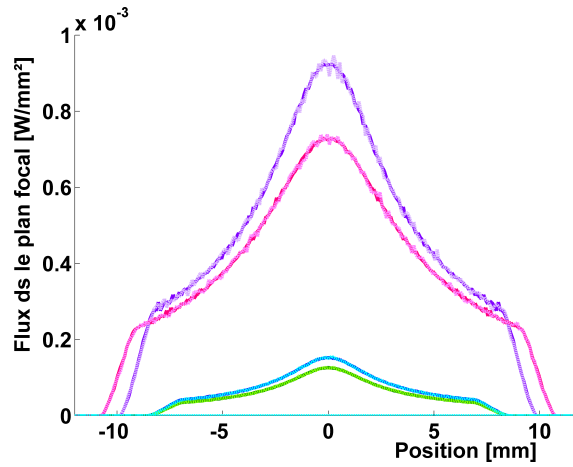


FIGURE J.5 – Puissance parvenant sur le détecteur pour les longueurs d’onde 400 (fuschia), 500 (mauve), 1500 (bleu) et 1600 nm (vert). La forme parabolique de la lentille est entrée sous forme de fonction dans ASAP[®]. Ordre de diffraction étudié : 0. Les courbes pleines correspondent à la simulation Matlab[®], tandis que les courbes claires, pointillées et bruitées correspondent à la simulation ASAP[®].

Annexe K Simulations thermiques : effets des caractéristiques du panneau

Influence des paramètres

Les paramètres les plus influents au niveau du panneau solaire sont : l'émissivité et l'absorptivité du matériau placé entre les cellules PV, le choix de la colle, et la conductivité du CFRP et du nid d'abeilles. Des exemples d'influences des trois premiers éléments sont repris dans les Figures suivantes (Figures K.1, K.2 et K.3). Ces figures sont réalisées à partir d'un panneau à plus faible conductivité que MESSENGER, conduisant à des températures initiales plus élevées. Néanmoins, l'influence des paramètres est observable. Premièrement point de vue émissivité (Figure K.1) : 10% de différence dans l'émissivité du revêtement entre les cellules accroît la température de près de 10°C (dans ce modèle). C'est donc un paramètre très important. La peinture blanche utilisée pour notre panneau possède une émissivité de près de 0.9. Nous avons cependant utilisé des valeurs plus basses, autour de 0.82. Les résultats devraient donc être meilleurs qu'annoncé. Ensuite

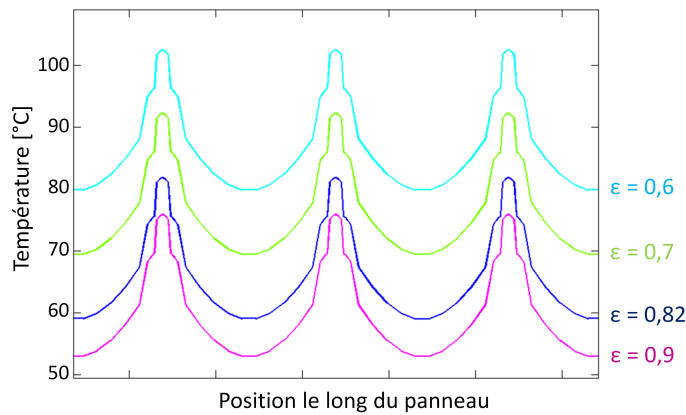


FIGURE K.1 – Exemple d'influence de l'émissivité du revêtement du panneau entre les cellules.

vient l'absorption du panneau. Selon la Figure K.2, l'influence est plus faible : entre une valeur de 0.2 BOL et 0.4 EOL, il y a moins de 3 degrés de différence. Sachant que la lentille protégera le revêtement des UVs, la valeur EOL devrait être très peu dégradée, et des valeurs proches de 0.2 sont raisonnables. Quant à la colle (Figure K.3), il faut viser une conductivité supérieure à 0.4 W/m.K pour réduire à moins de 2°C la différence avec une colle à très haute conductivité. Néanmoins, même de faibles valeurs de conductivité n'induisent pas d'augmentation drastique de la température. Bien sûr, ces résultats sont dépendants de l'épaisseur de colle effectivement déposée (51 μm par hypothèse dans notre cas).

Outre l'influence des paramètres présentée ci-dessus, nous pouvons aussi considérer l'utilisation d'un panneau à haute ou basse conductivité. La différence réside principalement dans la conductivité des fibres du CFRP et le nombre de ses couches, ainsi que les caractéristiques du nid d'abeilles. Un exemple de résultat est repris en Figure K.4, marquant l'importance de la conductivité du panneau choisi.

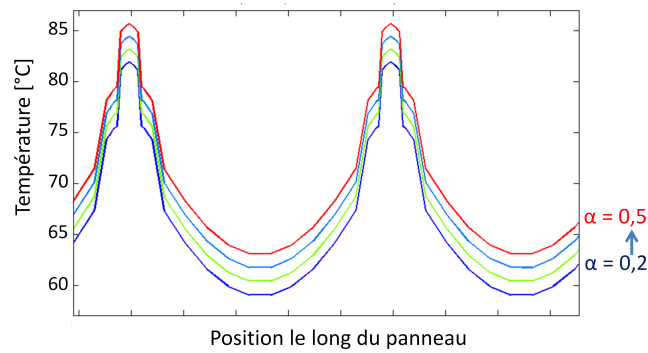


FIGURE K.2 – Exemple d'influence de l'absorption du panneau.

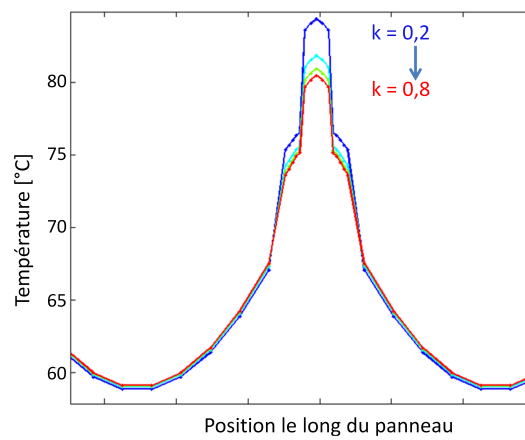


FIGURE K.3 – Exemple d'influence de la conductivité des couches de colle.

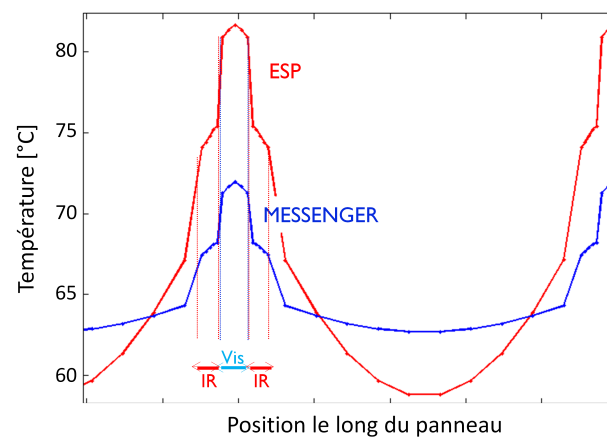


FIGURE K.4 – Comparaison des résultats sur base des panneaux des missions ESP et MESSENGER.

Cellules non-fonctionnelles

Au niveau du panneau MESSENGER, des cellules non-fonctionnelles font monter la température d'environ 30°C, donnant un pic autour de 100°C, ce qui ne devrait théori-

quement pas endommager le système.

Dépointage

Remarque sur le dépointage : les cellules n'ont une efficacité que de maximum 33%, c.-à-d. une absorbance équivalente de plus de 0.65. Le panneau, lui, a une absorbance entre 0.2 et 0.4. Ce qui veut dire qu'en cas de dépointage, la température locale du panneau n'excèdera pas celle calculée au niveau des cellules (d'autant plus que les cellules ont une couche d'isolation supplémentaire vis-à-vis du panneau). Le panneau ne devrait donc pas souffrir outre mesure d'un tel dépointage.

Annexe L Tolérancement et pertes optiques

L.1 Erreurs de fabrication

Angle de dépouille au niveau des réseaux de diffraction

L'effet d'un angle de dépouille sur un réseau blazé a été abordé en référence [110] (page 118). Il y a été montré que la diminution d'efficacité de diffraction est minimale si seule la hauteur des dents est impactée, c.-à-d. que l'angle de blaze et la période ne sont pas modifiés. D'après les simulations PC-Grate[®], un angle de dépouille de 2° réduit de 0.15 à 0.5% les efficacités de diffraction, que ce soit pour un réseau lamellaire ou blazé. Par contre, la diminution dans un ordre peut se traduire par une augmentation dans un autre aussi collecté, compensant en partie les pertes : par exemple, un angle de dépouille accroît l'ordre 2 et diminue l'ordre 1 dans le visible, or les deux ordres sont collectés par la cellule VIS dans la configuration blazée, on a donc une légère compensation. En pratique, on rencontre des angles de dépouille d'environ 1° seulement pour les réseaux de diffraction. Ainsi, bien qu'inhérent à la réalisation de réseaux blazé et lamellaire, l'angle de dépouille n'a qu'un effet très négligeable sur leur efficacité de diffraction.

Arrondis des dents de la lentille de Fresnel

La méthode de fabrication des structures dentelées cause l'apparition d'arrondis. Dans nos simulations, nous considérons que tout rayon parvenant sur cet arrondi est perdu. Pour simplifier les calculs, l'arrondi est donc traité comme une zone morte. On l'insère via une équivalence avec un angle de dépouille plus grand, recouvrant la zone d'arrondi aussi, cf. Figure L.1.

Pour le calcul, nous sommes repartis des équations de la référence [110], dans laquelle le développement complet est décrit. Les équations finales sont cependant rappelées ci-dessous. Soit r le rayon de l'outil de gravure, h la hauteur de design des dents, L la distance entre deux structures du profil, δ l'angle de dépouille. La projection d de l'angle équivalent correspond au dernier point de contact entre le cercle et le profil initial. ϕ est l'angle de dépouille équivalent, regroupant l'arrondi et l'angle de dépouille pour chaque structure de dent.

$$d = \frac{r \cdot h^2}{L^2 + h^2}$$

$$\tan(\phi) = \frac{d + \tan(\delta)(h/2 - H)}{h/2 - H}$$

avec $H = h.d/L$.

La fraction perdue à cause de l'ombrage peut être approximée par l'expression suivante :

$$2.d + \tan(\delta).h$$

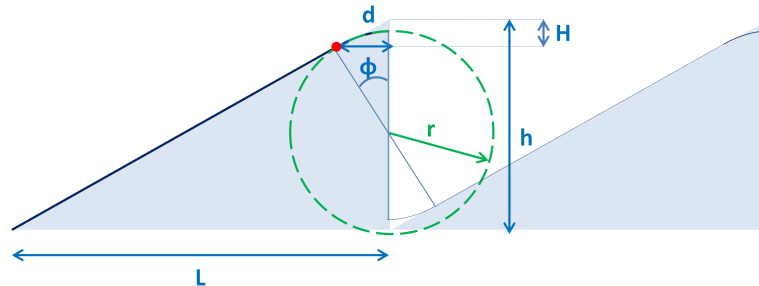


FIGURE L.1 – Schéma de l'arrondi au bout d'une dent de lentille de Fresnel

Les pertes dues à ces arrondis pour notre concentrateur sont traduites dans la Figure L.2 en fonction du rayon de l'outil utilisé. Au vu de ce graphique, la lentille de Fresnel est finalement plus sensible que le réseau, bien que considérer tous les rayons atteignant l'arrondi comme perdus soit un peu exagéré. La limite maximale pour limiter à moins d'1% de pertes se situe autour de 20 μm de rayon.

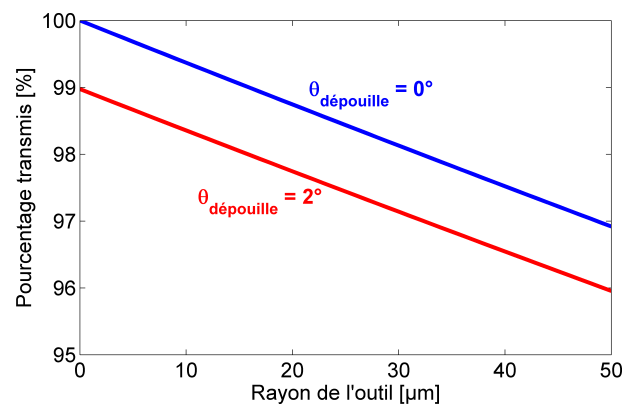


FIGURE L.2 – Facteur de transmission selon le rayon de l'outil utilisé pour la fabrication de la lentille. La hauteur fixe des dents est de 150 μm .

L.2 Erreurs sur le réseau de diffraction

Erreurs sur la période

De façon générale, si la période diminue/augmente, les angles de diffraction vont augmenter/diminuer, ce qui va déplacer entre autres les ordres ± 1 . Dans le cas blazé, la tache centrale va s'étaler, ce qui améliore temporairement les performances (plus de lumière IR diffractée à l'ordre 1 atteignant la cellule IR, uniquement dans le cas d'une diminution de période), avant que la lumière ne sorte de la cellule correspondante. Dans le cas lamellaire, les taches externes vont soit s'étaler (la période diminue), soit se rapprocher (la période

augmente), réduisant les performances dans les deux cas en sortant de la cellule correspondante. Seul le cas de l'élongation de la période accroît la distance entre ordres et donc la tolérance à l'incidence. Ces comportements sont décrits en Figure L.3.

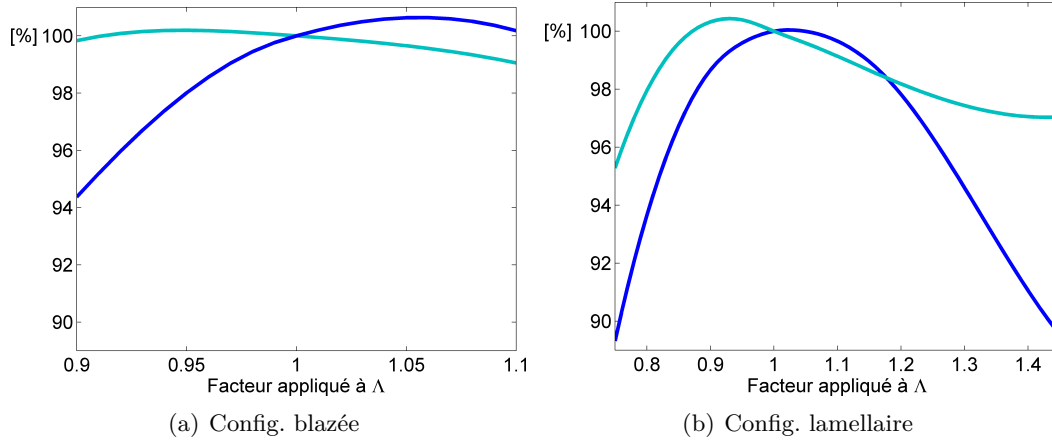


FIGURE L.3 – Effet d'un facteur de multiplication appliqué à la période du réseau de diffraction, sur la puissance de sortie P_{out} à respectivement 0° (courbe en bleu clair) et 0.8° d'incidence (courbe en bleu foncé).

C'est principalement la distance entre ordres qui définit le taux de pertes. Sans tenir compte de la tolérance au dépointage, les résultats ne seront pas modifiés pour autant que la différence des angles de diffraction ne couvre pas la distance entre ordres. Dans notre cas, la période peut descendre jusqu'à environ 90% de sa valeur initiale pour la configuration blazée, et augmenter jusqu'à 104% pour la configuration lamellaire. La sensibilité aux angles d'incidence augmente par contre directement. En accord avec la Figure L.3, en dessous de 2% de modification de période, toutes les performances demeurent au-dessus de 99% de leur valeur nominale. Ceci évidemment tient compte du fait qu'on utilise une lentille optimisée pour la période de design.

Décalage de la période par rapport à la lentille

Les configurations avec une période fixe ne sont pas vraiment concernées par le problème puisqu'à tout point de la lentille correspond la même période. Le seul effet serait une perte à cause d'une éventuelle zone non-couverte par le réseau. Par contre, pour les configurations à période variable, l'effet pourrait être différent : dans cette configuration, à chaque point de la lentille correspond une période différente... qu'arrive-t-il s'il y a un décalage ?

Notons d'abord que la période varie de tout au plus $10\text{ }\mu\text{m}$ sur la largeur de la lentille, soit sur 50 mm . Ce qui signifie que pour un décalage de 1 mm par exemple, la période varie de maximum $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$, c.-à-d. entre 1.5 et 2.5% de variation par rapport à sa valeur nominale. Or on a montré ci-dessus que pour une variation globale de moins de 2%, les résultats ne variaient que très peu. En simulation, on obtient une différence de position sur le bord des cellules à l'ordre 1 de moins de 0.05 mm (pour le décalage de 1 mm), ce qui se traduit par une modification de puissance de sortie de -0.03% . Ainsi, pour un décalage de moins de 1 mm , ce qui est déjà considérable, on ne devrait pas voir de différence notable dans le plan focal. Ce problème n'est donc pas primordial si le montage est bien fait.

L.3 Déformations

L.3.1 Effets d'un aplatissement des dents de la lentille

Un rétreint après démoulage ou un étirement en fonctionnement peuvent causer une déformation des dents de la lentille. Ces effets sont ici simplement simulés par un facteur d'aplatissement R (typiquement < 1), appliqué au profil de la lentille. Cet aplatissement a deux conséquences principales : l'augmentation de l'angle de dépouille, et la modification du profil de la lentille (principalement sa pente locale).

L'effet de l'angle de dépouille a été abordé en section L.1. Un facteur R appliqué au profil va modifier cet angle selon l'expression : $\tan(\delta_2) = \tan(\delta_1) \cdot 1/R$ avec δ_1 et δ_2 respectivement les angles de dépouille avant et après aplatissement. C'est-à-dire que pour un angle de dépouille de 2° à l'origine et $R = 95\% (/105\%)$, cet angle passe à $2.1^\circ (/1.9^\circ)$: l'effet est faible par rapport à la valeur de l'angle de dépouille à l'origine, il vaut donc mieux s'intéresser à réduire au maximum l'angle de dépouille à la fabrication, que s'inquiéter de son effet lors d'une déformation.

L'effet le plus important réside donc dans la modification de la pente locale de la lentille, qui va directement impacter la tache focale.

Changement de pente

Le profil étant multiplié par R , la pente locale ($\tan(\alpha)$) suit l'équation : $\tan(\alpha_2) = R \cdot \tan(\alpha_1)$.

On peut observer l'effet sur l'angle de sortie selon la pente de la lentille, pour différents paramètres R et selon l'ordre de diffraction, sur la Figure L.4. L'effet s'accroît évidemment pour les zones où la pente de la lentille est la plus forte. Ce sont donc les rayons provenant de la gauche de la lentille qui vont modifier les spots dans le plan focal. Ce comportement pour une lentille est repris en Figure L.5 : on y observe le déplacement des rayons venant de la gauche, tandis que ceux de la droite demeurent quasiment inchangés. Si l'on considère les deux lentilles ensemble, on retire de ce graphique qu'une correction est possible en déplaçant le plan des cellules PV : décalage vers le haut si $R > 1$ et vers le bas si $R < 1$, exactement comme pour une lentille classique.

Notons aussi que pour $R = 98\%$ et 102% , la distance entre les ordres 0 et 1 est fortement réduite (dans le plan focal initial à 0 mm sur la figure L.5). Ces deux points définissent donc pour la configuration blazée, les « limites » pour conserver la puissance de sortie à incidence nulle approximativement inchangée. La tolérance à l'angle d'incidence sera évidemment directement impactée. Pour s'en assurer, on peut tracer l'évolution des puissances selon la Figure L.6. On obtient en effet de larges pertes pour un rétreint(/extension) supérieur à $98\% (/102\%)$, comme on pouvait s'y attendre. La même réflexion peut être menée pour la configuration lamellaire, dont les résultats sont aussi reproduits dans la Figure L.6.

Comme annoncé, cette erreur peut être partiellement corrigée en modifiant le plan des cellules PV. Ceci est illustré pour la configuration lamellaire aux points $R = 105\%$ (zFoc = 4mm) & 95% (zFoc = -4mm) : la puissance de sortie passe de 95% à plus de 99% de sa valeur nominale. Ainsi, si l'erreur est connue, simplement se placer dans le meilleur plan focal permet de réduire son impact sur les performances.

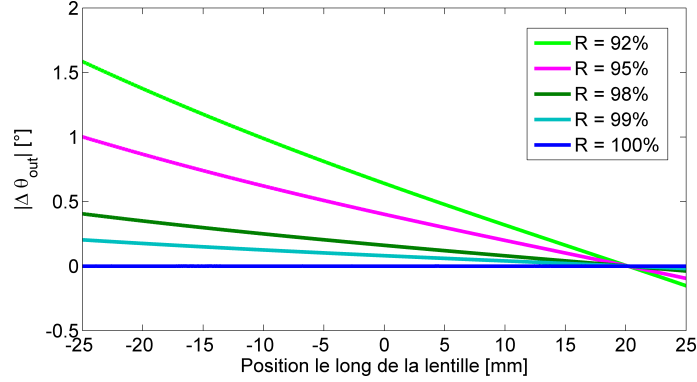


FIGURE L.4 – Différence d'angle de sortie selon la pente locale de la lentille (la position le long de la lentille), pour différents facteurs de forme (pour l'ordre 1, à incidence nulle). On peut approximativement appliquer la correspondance entre $R = 92\%$ et $R = 108\%$, et ainsi de suite. La pente locale à l'extrémité gauche de la lentille vaut -32.23° , tandis qu'à l'extrémité droite, on se situe à 4.5° .

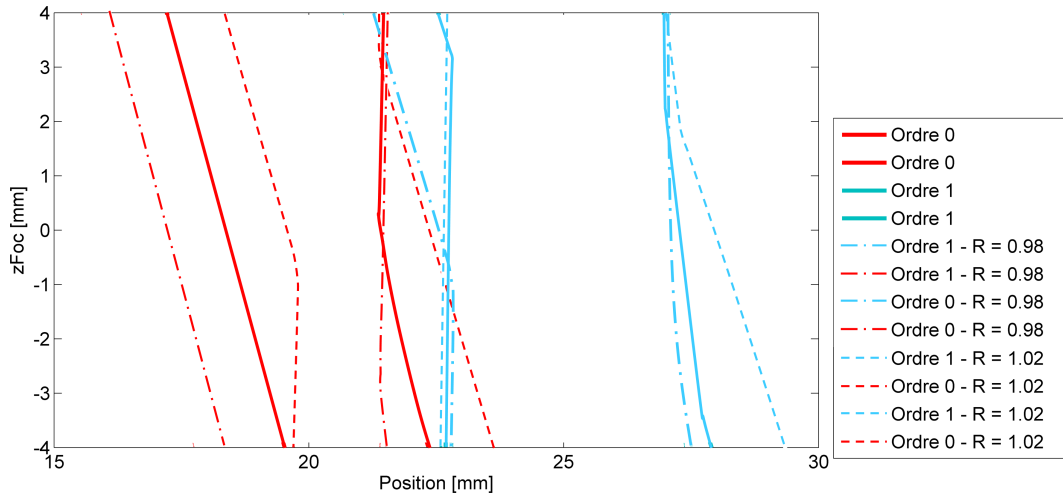


FIGURE L.5 – Rayons extrêmes des ordres 0 (rouge) et 1 (bleu) selon la distance avec le plan focal initial ($zFoc = 0$). Les modifications de directions et donc de tailles des taches focales sont décrits pour différents facteurs R appliqués au profil de la lentille. Configuration blazée.

L.3.2 Effet d'un rétreint, d'une extension,...

Etirement selon l'axe cylindrique (y) : les hauteurs sont modifiées

Les effets d'un facteur sur la hauteur des dents du réseau et sur le profil de la lentille (sans modifier l'axe le long des profils) peuvent être dissociés : l'un joue sur l'efficacité de diffraction, et l'autre sur l'efficacité de collection et de la séparation spectrale. On peut donc en première approximation simplement multiplier les dégradations dues à chaque facteur, détaillées en sections L.6 et L.3.1.

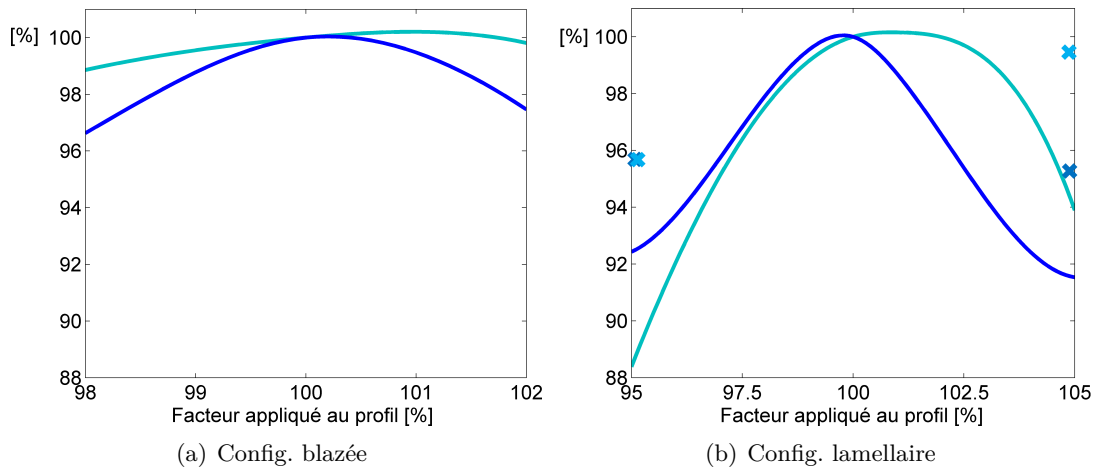


FIGURE L.6 – Effet sur la puissance de sortie d’une erreur de pente au niveau de la lentille, selon le facteur appliqué au profil. La courbe en bleu clair décrit la puissance de sortie à incidence nulle, et celle en bleu foncé, à 0.8° d’incidence.

Extension selon l’axe x : modification de la hauteur et de la largeur

Une extension combine les effets d’un aplatissement de la lentille et ceux d’une variation de période. Nos éléments optiques étant quasiment des demi-lentilles, les deux effets s’additionnent : un aplatissement de la lentille va réduire l’angle de réfraction, et un allongement de la période va aussi réduire l’angle de diffraction. Ainsi, non seulement les dimensions des spots vont augmenter, mais surtout la distance entre les ordres diminue. Cependant, l’erreur due à un aplatissement des dents de la lentille est bien plus grande que celle due à la variation de période : alors que l’une modifie l’angle de plusieurs dixièmes de degrés (voir Figure L.4), l’autre induit une erreur d’un ordre de grandeur en-dessous, et sera donc minoritaire sur la majorité de la surface de la lentille (excepté proche de l’apex). A ces effets s’ajoute une variation horizontale du vecteur XP (vecteur position le long de l’axe x) qui élargit encore les taches focales. Les résultats seront donc un peu inférieurs à ceux obtenus avec un simple aplatissement de la lentille (section L.3.1).

En Figure L.7, on peut observer l’accroissement de la sensibilité dû à l’ajout de la variation du vecteur XP principalement, et aussi un peu de la variation de période : la puissance à incidence nulle passe de la courbe pointillée (facteur R mais pas de modification de XP ni Λ) à la courbe pleine (facteur R et modification de XP et Λ). Le système est donc plus sensible qu’avec un simple aplatissement des dents de la lentille : au lieu de 99 et 102% pour ne quasiment pas modifier la puissance à incidence nulle, on passe à 99.5 et 101% pour la configuration lamellaire. Les valeurs calculées sont approximatives, mais donnent une idée des effets que peut avoir une extension de la lentille. La modification du vecteur XP accroît notablement la sensibilité des performances, il est donc important de conserver la bonne largeur de lentille.

Correction

On a vu en section L.3.1 que travailler dans un plan focal différent de celui de design permet de réduire la sensibilité du système. La variation de XP accentue principalement

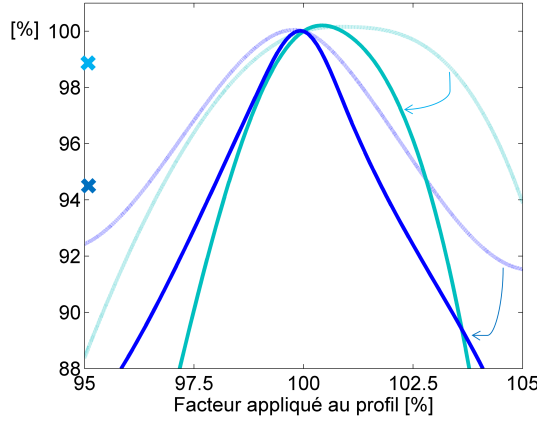


FIGURE L.7 – Variation de P_{out} selon le facteur d'extension : $1/R \times \text{profil}$ (aplatissement); $R \times \text{période}$ et $R \times \text{XP}$. Configuration lamellaire. Courbe en bleu foncé pointillée : P_{out} avec rétreint vertical, courbe en bleu foncé pleine : P_{out} avec rétreint vertical ET horizontal. Courbes en bleu clair pointillée/pleine : $P_{\text{out}0.8^\circ}$ avec rétreint vertical/+horizontal. Croix en bleu clair/foncé : P_{out} et $P_{\text{out}0.8^\circ}$ si l'on se place dans un plan focal à -18 mm.

l'effet de l'aplatissement des dents, ce qui fait qu'il est toujours possible de corriger en décalant vers le bas/haut la lentille par rapport au plan des cellules. Ceci donne les deux croix pour $R=0.95$ dans la Figure L.7 : si on peut décaler la hauteur selon la lentille que l'on obtient, cette erreur de rétreint n'est plus aussi influente. Néanmoins, cet effet reste à surveiller selon les tolérances sur les performances qui ont été fixées.

L.3.3 Effet d'une courbure globale

Nous abordons ici la question d'une courbure globale de l'élément optique (composé des deux lentilles symétriques) : les deux faces restent parallèles, mais sont courbes. La méthode de calcul est présentée ci-dessous, suivie de la description des modifications induites par cette courbure. La flèche définit la hauteur entre la position initiale et le maximum de courbure (Figure L.8). La symétrie sur l'élément permet de compenser un peu les effets d'une courbure.

Courbure de la lentille

La lentille peut se déformer de bien des manières, et notamment par une courbure. En première hypothèse, on considère une courbure de l'entièreté de l'élément optique (comprenant les deux lentilles symétrique) de type sphérique, en fonction de la flèche (voir dessin en Figure L.8). La déformation étant a priori faible, on approxime que la largeur de la lentille reste la même et que le vecteur x aussi demeure le même. Par la suite, on peut aussi prendre en compte la déformation du vecteur x .

Les coordonnées de la lentille s'expriment alors comme suit, avec R_{courbure} le rayon du cercle de la courbure et R_{lens} la demi-largeur de la lentille,

$$y' = y + \sqrt{R_{\text{courbure}}^2 - x^2} - \sqrt{R_{\text{courbure}}^2 - R_{\text{lens}}^2} \quad (\text{L.1})$$

$$x' = x \quad (\text{L.2})$$

et la flèche D s'écrit

$$D = R_{\text{courbure}} - \sqrt{R_{\text{courbure}}^2 - R_{\text{lens}}^2} \quad (\text{L.3})$$

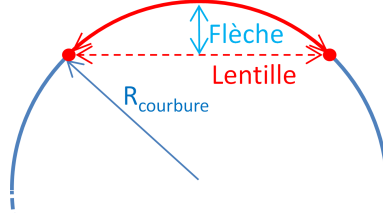


FIGURE L.8 – Schéma de la courbure de la lentille, et définition de la *flèche*.

Modifications dans le plan focal

Les modifications dans le plan focal proviennent principalement des deux points suivants :

1. *La modification de l'angle de réfraction* : les angles de réfraction sont accentués d'autant plus que la pente locale est forte, tout comme c'était le cas en Figure L.4. L'effet pour l'ordre 1 est à peine plus marqué que pour l'ordre 0. Dans l'équation suivante, on en a l'illustration, avec α la courbure locale, et γ la pente de la dent locale, $\theta_{\text{inc}} = 0^\circ$, ordre 0 :

$$\theta_{\text{out}} = \alpha + \gamma - \text{asin}\left(\frac{n_2}{n_1} \sin(\text{asin}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right) + \gamma)\right)$$

Pour $\gamma = 0$, on retrouve $\theta_{\text{out}} = \alpha - \alpha = 0$, c.-à-d. que cela se compense pour des surfaces parallèles. Mais dès qu'une pente s'ajoute, ce n'est plus le cas : les α ne se simplifient plus, et l'angle de sortie est plus grand.

2. *Une différence de hauteur le long de la lentille* par rapport au plan focal. Le mieux est alors d'avoir la zone d'où proviennent les « plus grands angles » la plus proche possible de la position initiale : les différences engendrées par les plus petits angles seront moins importantes, même pour un plus grand déplacement vertical. Notons que les zones avec les plus grands angles sont sur les bords et donc retenues par les montants : ces zones seront donc naturellement les plus proches de la position initiale.

Etant donné que (1) la partie gauche de la lentille reste à bonne hauteur (celle des montants), et que c'est là qu'on observe les plus grandes pentes et modifications d'angle de sortie, et que (2) le reste de la lentille, bien que plus bas/haut, n'a que de faibles angles de sortie ce qui fait que malgré leur différence de hauteur, l'effet dans le plan focal est faible, le résultat sur les taches focales sera semblable à celui d'une simple modification des pentes des dents de la lentille, comme traité en section L.3.1. On aura donc un graphique semblable (pour de petites courbures, un peu différent si elle augmente) à celui en Figure L.5, avec le $R > 1$ (< 1) correspondant à une courbure négative (/positive). Maintenant, point de vue puissance de sortie, ce sera un peu différent dans le sens où avec la courbure, le facteur appliqué aux dents n'est pas constant le long de la lentille, de sorte que même si les comportements des rayons de « bord » sont semblables, il n'en est pas de même pour ceux au centre (dont la modification sera moindre) : les résultats sont meilleurs ici, voir

Figure L.9.

Ainsi, en termes de performances, l'effet d'une courbure de flèche absolue inférieure à 2.5 mm a un effet positif pour la puissance à incidence nulle et même sur la tolérance à l'angle d'incidence pour la configuration lamellaire (elle diminue un peu pour la configuration blazée), notamment grâce à une réduction des pertes par ombrage des dents de la lentille, et une répartition différente dans le plan focal. L'effet devient négatif pour l'incidence nulle vers -6 et +10 mm pour la configuration blazée, et -5.5/+4 mm pour la configuration lamellaire. Le comportement de la puissance à 0.8° d'incidence est différent selon la configuration, toujours à cause de l'inversion des positions des ordres de diffraction.

Remarque : dans les calculs, on a fait l'hypothèse d'une faible courbure, et par conséquent, d'une faible modification de la distance horizontale, nous n'avons donc pas changé le vecteur horizontal. Bien sûr, cela peut aussi jouer et ajouter à l'effet général. En insérant la variation du vecteur XP, pour une flèche de 1.25 mm par exemple, on a un décalage des taches focales de moins de 0.02 mm vers la droite, ce qui a une influence de moins de 0.1 W/m² sur la puissance de sortie à 0.8° et quasiment aucune sur la puissance à incidence normale. L'option de négliger la modification du vecteur XP est donc cohérente pour de relativement faibles courbures.

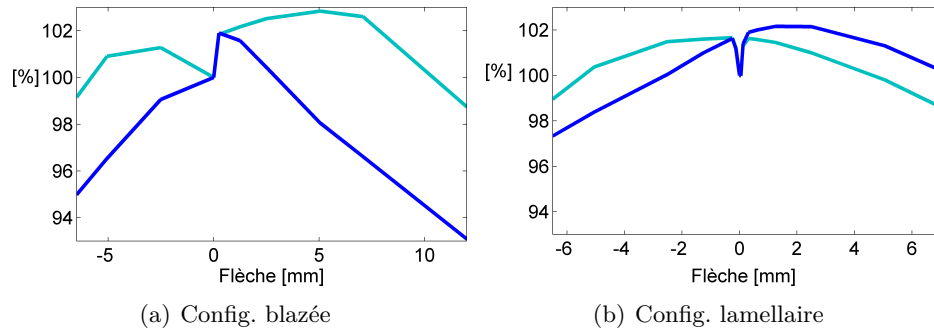


FIGURE L.9 – P_{out} selon la flèche : cela améliore les résultats pour de petites courbures. Ligne en bleu clair : P_{out} . Bleu foncé : $P_{out,0.8^\circ}$. A noter que le graphique est fait avec des cellules idéales, et que donc la courbe pourrait être modifiée si l'on utilise des cellules PV réelles. Néanmoins, le comportement général demeure le même. Les différences de comportement entre les configurations blazée et lamellaire sont encore dues aux positions différentes des ordres ± 1 .

L.4 Erreurs d'assemblage

L.4.1 Parallélisme réseau/lentille

Une erreur de parallélisme peut aussi engendrer une modification des angles et donc des performances. Dans le cas des configurations avec période variable, cela peut de plus décaler la position de cette période par rapport à la lentille.

Faces non-parallèles

Considérons que les faces ne sont pas parallèles, le réseau est aligné par rapport au soleil, et la face de la lentille est donc inclinée. Alors, la pente locale au niveau de la lentille est amplifiée par l'inclinaison de la lentille. Dans le sens d'une augmentation de la pente, l'angle de sortie de la lentille sera plus grand et comme d'habitude,

plus la pente de la dent de la lentille est grande, plus l'effet sera important, comme l'illustre la Figure L.10. En moyenne, les taches focales seront donc décalées vers

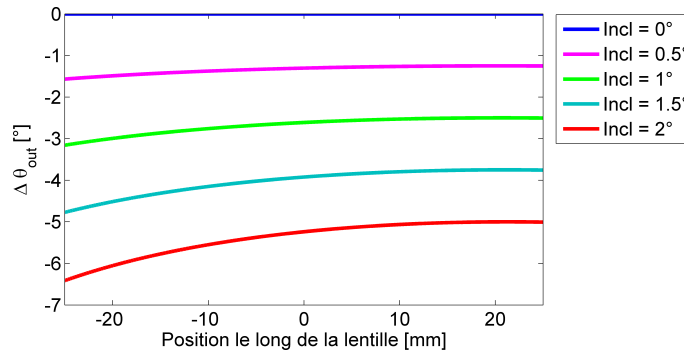


FIGURE L.10 – Différence dans l'angle de sortie le long de la lentille pour différentes inclinaisons de la face de la lentille (Incl). La pente locale des dents va de -32.23° à 4.5° de l'extrémité gauche à l'extrémité droite de la lentille.

la droite pour une inclinaison positive, avec une légère différence entre les zones de la lentille. Etant donné que la lentille symétrique voit une inclinaison « négative », la somme des taches focales sera en effet globalement décalée à droite. Mais elles ne seront plus parfaitement symétriques comme auparavant. Ce décalage va donc réduire l'efficacité de la séparation spectrale jusqu'à ce que les spectres et les cellules ne correspondent plus. Les effets en termes de puissance de sortie sont décrits en Figure L.11.

Comme a priori cette erreur apparaît lors de la fabrication, on peut partiellement corriger les pertes en décalant simplement les cellules PV par rapport à la lentille comme illustré en Figure L.11 par les croix. Ainsi, pour un angle de 1.5° , on réduit considérablement les pertes : à incidence nulle, moins de 1% de pertes, à 0.8° d'incidence, on a 8% de pertes au lieu de plus de 50%. Cette erreur, tant qu'elle reste sous 1 à 2° , peut être considérée comme négligeable dans la mesure où l'on peut ajuster l'alignement des cellules lorsque l'erreur est connue (ce qui est sensé être le cas puisqu'elle apparaît à la fabrication). En effet, au-dessus de 2° , la non-linéarité décrite en figure L.10 modifie trop les dimensions des taches focales et ne permet plus de demeurer aux mêmes performance simplement en déplaçant les cellules PV. On peut se demander s'il vaut mieux incliner la lentille ou le réseau ? Il semble que ce soit quasiment identique du point de vue des angles de sorties, avec une légère différence pour les zones avec de plus grandes pentes au niveau des dents. L'avantage en ces points serait à la configuration avec le réseau incliné, mais la différence est faible.

Décalage de la période

La lentille est extrêmement fine (environ $400\text{ }\mu\text{m}$). Ainsi, le calcul de la période que voit réellement chaque point de la lentille en remontant à la face avant affiche très peu de différence avec le vecteur période tel quel (cf. hypothèse d'épaisseur nulle, voir section 10.2). Bien qu'une pente accroisse l'angle et donc potentiellement l'importance de cette hypothèse, les simulations montrent une variation négligeable des résultats pour des inclinaisons inférieures à 1° .

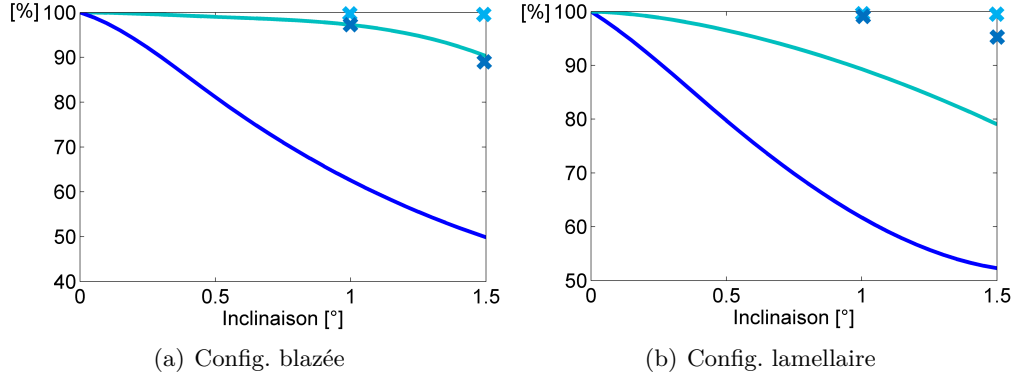


FIGURE L.11 – Effet lorsque le réseau et la lentille ne sont pas parallèles, pour les configurations symétriques blazée et lamellaire, avec périodes variables. Ligne en bleu clair : P_{out} . Bleu foncé : $P_{out, 0.8^\circ}$. Cette erreur peut être rattrapée en décalant les cellules PV dans le plan focal, donnant les croix sur les graphiques.

L.4.2 Alignement élément optique vs cellules PV

Un mauvais alignement lentille/cellules PV pour un système mono-cellule ne change pas la puissance à incidence nulle tant que le spot ne sort pas de la cellule. La tolérance à l'angle d'incidence par contre diminue dès que l'on ne se trouve plus au milieu de la cellule. Dans notre cas, étant donné que les cellules du bord ne sont pas « surdimensionnées », la puissance diminuera directement (lentement) tant que le spot central demeure dans les limites de la cellule centrale. Dès qu'il en sortira, la diminution sera plus forte. La tolérance à l'angle d'incidence diminue aussi dès le début. Le seul avantage de la séparation spectrale est que lors d'un décalage/désalignement, en sortant de la cellule centrale, la lumière peut toujours être partiellement convertie par les cellules de côté.

En termes de chiffres, pour un décalage de moins de 0.1 mm, la puissance à incidence nulle et la tolérance demeurent au-dessus de 99% de leurs valeurs nominales pour les designs avec séparation spectrale. Une précision de 0.1 mm semble tout à fait accessible mécaniquement.

La différence entre les configurations avec et sans séparation spectrale se marque plus fortement pour des décalages supérieurs : à 0.5 mm de décalage, les performances diminuent à 99% à incidence nulle, et à resp. 90% (blazé) et 88% (lamellaire) à 0.8° , tandis que pour le design sans séparation spectrale, bien qu'à incidence nulle la puissance soit quasiment encore à 100%, à 0.8° d'incidence elle diminue à seulement 65% de sa valeur initiale.

L.4.3 Distance focale

La Figure L.5 peut aider à visualiser ce qu'il se passe lors d'une erreur sur la distance entre l'élément optique et le panneau, puisqu'elle dessine le comportement des spots selon l'écart avec le plan focal, notamment pour le design initial. Une diminution de la distance entre les ordres va réduire en premier lieu la tolérance à l'angle d'incidence, et ensuite la puissance à incidence normale dès qu'il y a superposition ou que l'on passe sur la mauvaise cellule. Pour la configuration blazée, Figure L.5, on peut déduire qu'un rapprochement ($\Delta f_{eff} < 0$) de moins de 3 mm va quasiment uniquement modifier la puissance de la cellule IR collectant l'ordre 0 (la puissance totale va donc peu diminuer), modifiant aussi

la tolérance. Au-dessous de -4 mm, l'effet va s'amplifier car l'ordre 1 va aussi participer à la réduction de la distance entre ordres. Dans le sens d'un éloignement ($\Delta f_{\text{eff}} > 0$), jusque 3 mm, la puissance nominale devrait rester la même, bien que la tolérance diminue directement comme la distance entre ordres diminue. A plus de 4 mm, les taches se superposent et l'efficacité de la séparation spectrale diminue considérablement. Le même raisonnement peut être appliqué à la configuration lamellaire.

Les résultats en termes de puissances de sortie sont repris en Figure L.12. On observe évidemment que la tolérance à l'angle d'incidence est la plus sensible à une différence avec la configuration de design. Elle est cependant moins sensible pour le design lamellaire.

Notons tout de même que si le système est bien aligné, la puissance totale de sortie est relativement peu sensible à une erreur de distance focale de ± 3 mm comme annoncé pour la configuration blazée, -2/+6 mm pour la configuration lamellaire, ce qui laisse une large marge d'erreur. Mais ensuite, il faut prendre en compte les objectifs sur la tolérance au dépointage. Une erreur inférieure à ± 1 mm permet de conserver toutes les performances au-dessus de 99% de leur valeur initiale.

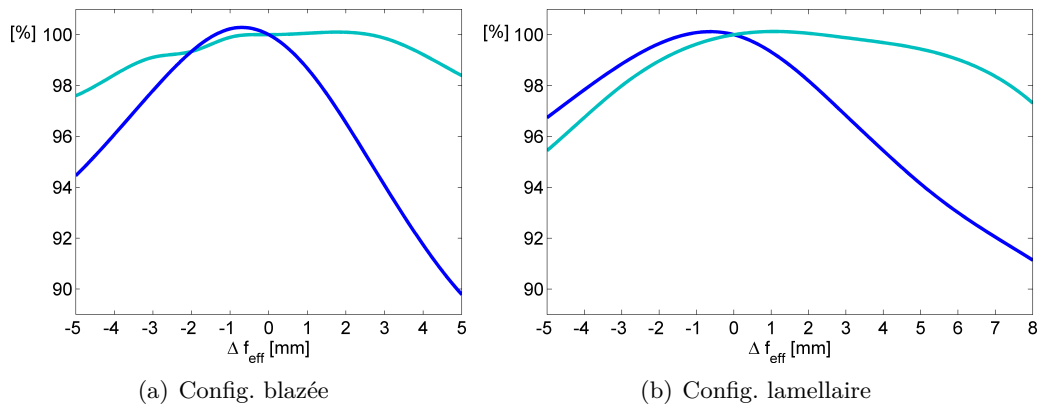


FIGURE L.12 – Effet d'une modification de la distance focale sur la puissance de sortie P_{out} à respectivement 0° (courbe en bleu foncé) et 0.8° d'incidence (courbe en bleu clair). La distance focale de design vaut 150 mm.

L.4.4 Dimensions des cellules PV

On peut aussi considérer une erreur sur le placement de la limite entre les cellules, ou sur leurs dimensions, ce qui jouera surtout sur la tolérance à l'angle d'incidence tant qu'elle ne dépasse pas la distance limite entre ordres. L'intuition sur base de la Figure L.5, ainsi qu'une simulation numérique, montrent qu'une approximation de ± 0.1 mm sur les dimensions des cellules (aux bords ou au centre) induit moins de 0.2% de pertes à incidence nulle, et moins de 0.8% à 0.8° d'incidence, ce qui est assez faible. Il semble logique que ces erreurs soient de l'ordre de celles dues à un décalage, traité au point L.4.2. Evidemment, combiné avec un décalage des cellules, l'effet pourrait être accru et est à surveiller.

L.4.5 Inclinaison élément optique vs panneau

L'évolution de la différence d'angle de sortie (toujours par rapport à la verticale, donc à la normale au panneau dans ce cas-ci) selon l'inclinaison et la position le long de la lentille

est reprise en Figure L.13. Si l'on compare brièvement avec le graphique en Figure L.4, on observe que la courbe à $R = 0.98$ choisie comme limite (moins de 1% de pertes) correspond approximativement à un angle de 1.5° d'inclinaison : ceci donne une première indication quant à l'inclinaison maximale acceptable. Par contre, le comportement pour une incidence non-nulle sera ici plus sensible étant donné qu'un angle d'incidence « s'ajoute » à l'inclinaison principale.

D'après les simulations de la configuration blazée, à 1.5° d'inclinaison, on perd 1% à « incidence nulle », mais près de 15% pour 0.8° d'incidence. Si l'on veut se limiter à 10% de perte pour une incidence de 0.8° , on doit éviter des inclinaisons plus grandes que 1° . Le cas lamellaire est un peu plus sensible à incidence nulle : 1% de perte à 1° , pour 10% à 0.8° d'incidence.

Pour limiter des pertes à moins de 1% à incidence non-nulle aussi, il faut se limiter à des inclinaisons inférieures à 0.15° .

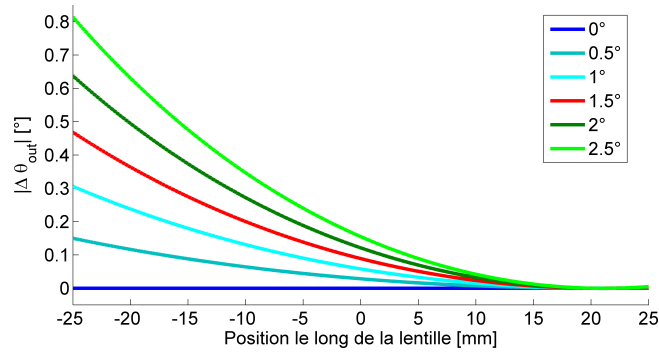


FIGURE L.13 – Différence d'angle de sortie selon l'inclinaison de l'élément optique par rapport au panneau et au soleil, pour $\lambda = 500$ nm.

L.5 Indice de réfraction

Effet sur l'efficacité de diffraction

Pour un profil de réseau fixe, une variation d'indice modifie la longueur d'onde de blaze du réseau, selon l'équation (4.11). Un exemple de résultats est repris en Table L.1.

En section L.6, on verra qu'une variation de longueur d'onde d'un facteur entre 0.9 et 1.05 de sa valeur de design réduit la puissance à incidence nulle de moins de 1%. Ceci correspond à un ΔT d'environ $+100^\circ\text{C}$ dans un sens et -50°C dans l'autre, ce qui est déjà conséquent. Ainsi, si le ΔT entre la température de fabrication et celle de fonctionnement est inférieur à ces valeurs, la modification de l'efficacité de séparation spectrale induira moins d'1% de modifications des performances. Déterminer la hauteur optimale du réseau pour la température de design peut néanmoins s'avérer intéressant de sorte à minimiser les écarts potentiels.

ΔT [$^\circ\text{C}$]	-75	-50	-10	0	10	50	75
λ_{blaze} [nm]	536	524	505	500	495	476	464

TABLE L.1 – Changement de longueur d'onde de blaze selon la variation de température par rapport à celle de design, avec $h = 1195$ nm (optimum pour $\lambda_{\text{blaze}} = 500\text{nm}$ à 25°C).

Effet sur les angles de sortie

L'équation de l'angle de diffraction dans le vide demeure toujours la même, mais sa valeur dans la lentille est impactée par l'indice de réfraction via l'équation de Snell-Descartes (4.1), soit en $1/n(T)$. Etant donné que l'angle de diffraction est plus important pour les grandes longueurs d'onde, celles-ci seront plus impactées par la modification d'indice. Entre 25°C et -40°C , on a une différence de 0.063° (pour $\lambda = 1600\text{ nm}$) dans l'angle de diffraction. Cette valeur est largement inférieure à la divergence du soleil ($\pm 0.26^\circ$), et pour un $F\#$ de 3, cela correspond à un décalage dans le plan focal de $\approx 0.16\text{ mm}$. Sur la dimension des cellules ($\approx 5\text{ mm}$), ceci a peu d'effet. Néanmoins, ceci peut réduire d'autant de degrés la tolérance aux erreurs de pointage. A cette modification de l'angle dans la lentille, s'ajoute la modification à la sortie lors de la réfraction au niveau des dents de la lentille. En fonction de l'angle d'incidence sur la seconde interface de l'élément optique, c.-à-d. l'interface « lentille », on peut calculer l'angle à la sortie dépendant de l'indice de réfraction $n(\lambda, T)$ et de la pente locale du profil, toujours via la loi de Snell-Descartes. En reprenant les pentes locales du profil de la lentille avec réseau blazé, on obtient le résultat de la Figure L.14.

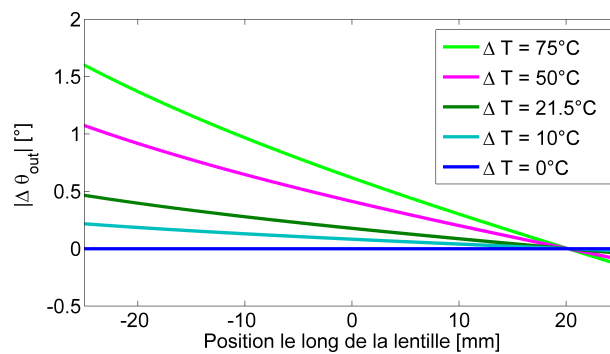


FIGURE L.14 – Valeur absolue de la différence d'angle de sortie de la lentille selon la pente locale de la lentille et pour différentes températures (avec $\lambda = 1600\text{ nm}$). Ceci illustre bien la supériorité de l'effet réfractif par rapport au diffractif sur la majorité de la surface de la lentille. A noter que l'angle de sortie pour $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ vaut de base -22.37° .

Le plus grand effet a évidemment lieu lorsque la pente de la lentille est la plus grande, c.-à-d. au bord gauche de la lentille : le résultat est très proche de celui obtenu lors de l'étude d'un aplatissement (voir Fig. L.4) si l'on néglige l'effet sur l'angle de diffraction qui est de toute façon beaucoup plus faible à l'exception de la zone près de l'apex de la lentille. Ainsi, on observe des comportements de taches focales presque identiques pour un ΔT positif et pour un facteur d'aplatissement < 1 et inversement. La Figure L.5 peut donc être utilisée pour visualiser les déplacements dans le plan focal : les $R = 0.98$ et 1.02 correspondent respectivement approximativement à des $\Delta T = +21.5^\circ\text{C}$ et -21.5°C , avec de légères modifications selon la longueur d'onde. L'aplatissement choisi pour éviter plus de 1% de pertes était de 99 à 101%, ce qui correspond environ à des ΔT inférieurs à $\pm 10^\circ$.

Effet sur la puissance de sortie

Un exemple de l'évolution de la puissance de sortie selon ΔT est repris en Figure L.15 pour les configurations blazée et lamellaire. La forte dépendance de la tolérance à l'angle d'incidence illustre bien la nécessité de faire le design avec les paramètres correspondant à

la température de fonctionnement supposée. Néanmoins, sur ± 5 à 7°C , les différences ne sont pas très marquées (moins d'1% de pertes).

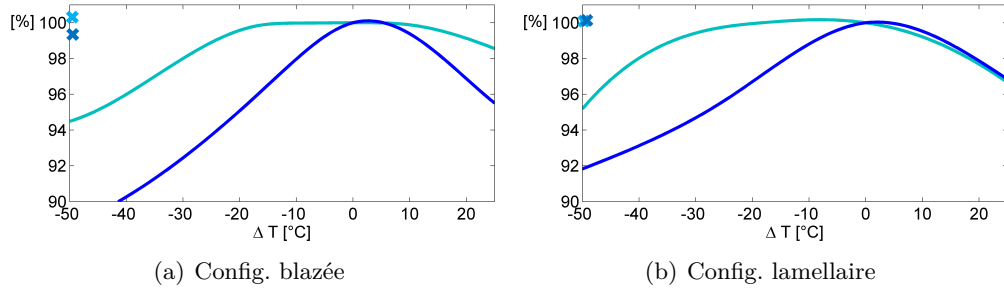


FIGURE L.15 – Evolution de la puissance de sortie, tolérance aux erreurs de pointage selon le ΔT [°C] rencontré. La température de design est de 25°C . Courbe en bleu clair : puissance à incidence nulle. Courbe en bleu foncé : puissance à 0.8° d'incidence. Les croix correspondent à un ajustement vertical de la lentille pour corriger le ΔT .

Auto-correction

L'effet de rétreint quand la température diminue peut-il être compensé par celui de l'augmentation de la température de design théorique ? Pour un design optimum, on peut faire les hypothèses suivantes :

- fabrication de l'élément optique à 20°C , et utilisation à $10^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T = 10^\circ\text{C}$ et $R = 1 - 0.0032 = 0.9968$.
- design fait avec l'indice de réfraction à la température d'utilisation.

Mais on peut essayer de compenser le rétreint inévitable soit par un design plus grand, en en tenant compte, soit en utilisant un indice de réfraction un peu différent. Pour compenser un rétreint de 99.68%, il faut un ΔT de -4°C . Donc si le design est fait avec un indice $n(T_{\text{fonctionnement}} + 4^\circ\text{C})$, on devrait être en mesure d'auto-corriger partiellement les erreurs dues aux différences thermiques (rétreint et indice de réfraction). Ceci n'a cependant d'intérêt que lorsque le rétreint commence à jouer sur les résultats, c.-à-d. aux alentours de 98%, soit un $\Delta T \approx 60^\circ\text{C}$ entre la température de fabrication et celle de fonctionnement.

L.6 Correspondance entre les bandes interdites et la longueur d'onde de blaze

Pour étudier la tolérance, les différentes situations sont simulées avec des EQEs idéales : respectivement une erreur sur $E_{g,0}$, une erreur sur $E_{g,1}$, et une erreur sur la longueur d'onde de blaze. Chaque situation est étudiée indépendamment.

Les résultats pour la configuration blazée/lamellaire avec période variable sont repris en Figure L.16. Notons que l'effet sera plus important pour une erreur sur la cellule PV contribuant le plus à la puissance de sortie totale. La configuration blazée est donc moins sensible en ce qui concerne sa jonction IR, contribuant beaucoup moins à la puissance totale de sortie que la jonction VIS.

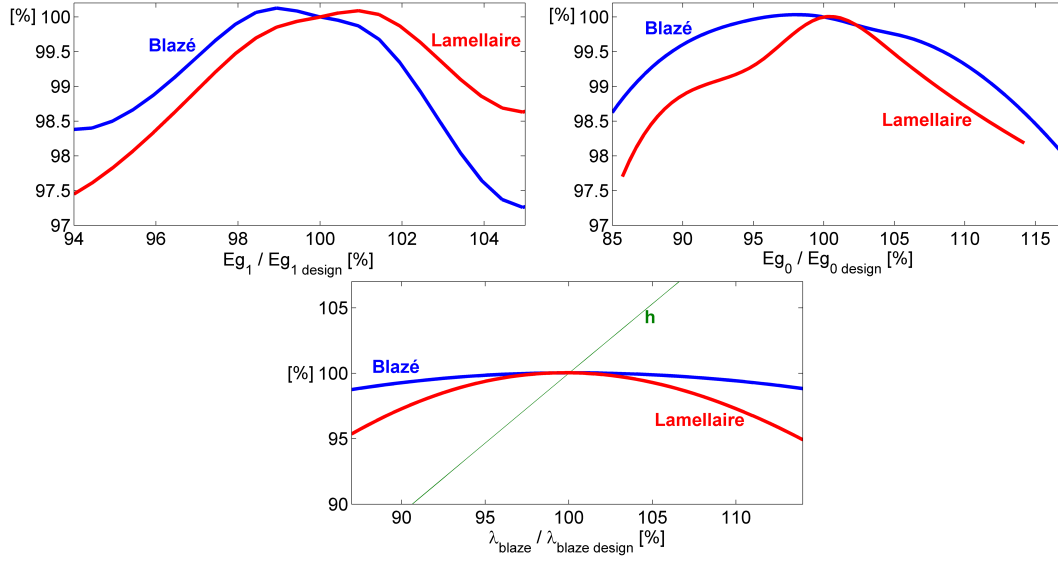


FIGURE L.16 – Variation de P_{out} selon les erreurs sur les E_g et sur la longueur d'onde de blaze. La configuration de design blazée a les paramètres suivants : $E_{g1 \text{ optim}} = 1.65 \text{ eV}$, $E_{g0 \text{ optim}} = 0.85 \text{ eV}$ et $\lambda_{\text{blaze}} = 510 \text{ nm}$. La configuration lamellaire : $E_{g1 \text{ optim}} = 1.65 \text{ eV}$, $E_{g0 \text{ optim}} = 1.05 \text{ eV}$ et $\lambda_{\text{blaze}} = 560 \text{ nm}$.

Annexe M Jaunissement du silicone sous VUV

L'équation utilisée pour simuler l'évolution de la transmittivité (augmentation de l'absorption) du silicone en fonction de l'irradiation cumulée des UV (E) est celle de la référence [79, 135] :

$$T(\lambda, E) = T_0(\lambda) \frac{1}{(1 + a_f \cdot E)^{b_f(\lambda)}} \quad (\text{M.1})$$

avec T_0 la transmittance avant irradiation, et les paramètres a_f et b_f définis ci-dessous.

Le paramètre b_f est donné par la Figure M.1 selon la formule ci-dessous :

$$b_f(\lambda) = \frac{\sigma_i(\lambda) - \sigma_o(\lambda)}{\sigma_{if} - \sigma_{of}} \cdot \frac{2}{S_f} \quad (\text{M.2})$$

Le paramètre a_f dépend de la longueur d'onde. Il a donc été mesuré pour différents filtres. Ces données sont reprises dans le tableau M.1, pour une épaisseur de silicone de $40 \mu\text{m}$. On utilise la relation suivante pour obtenir sa valeur pour l'épaisseur de lentille considérée :

$$\frac{a_f(d_1)}{a_f(d_2)} = \frac{1 - \exp(-n\sigma_{of}d_1)}{1 - \exp(-n\sigma_{of}d_2)} \quad (\text{M.3})$$

L'effet des VUV, sous 200 nm , est aussi présenté en référence [77].

Les simulations collent assez bien aux mesures expérimentales, comme l'illustre la Figure M.2.

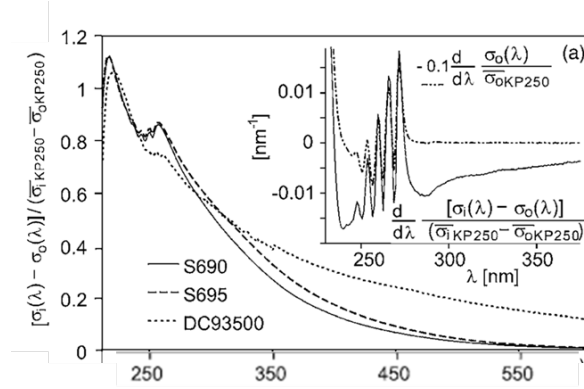


FIGURE M.1 – Différence des sections d'absorption des chromophores avant et après irradiation, $\sigma_i(\lambda) - \sigma_0(\lambda)$. Les sections sont normalisées par celles du filtre KP250, $\sigma_{iKP250} - \sigma_{oKP250}$ [135].

Filtre	$\Delta\lambda_f$ [nm]	a_f [mm ² /J]	S_f	$n\sigma_{of}^-$ [1/μm]
KP250	230-250	0.03	20	0.004
BP275	250-282	0.03	97	0.003
BP305	282-320	0.003	130	0.003
BP325	320-355	0.0015	210	0.003
CMX	350-400	0.002	320	0.003

TABLE M.1 – Résumé des constantes a_f , de la constante de saturation S_f et du coefficient d'absorption $n\sigma_{of}^-$ du silicone avant irradiation [135]. La transmission du CMX a été artificiellement coupée à 400 nm.

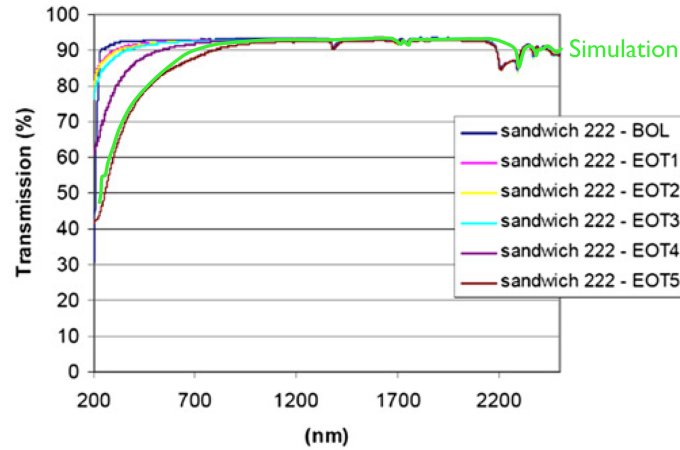


FIGURE M.2 – Spectre UV-VIS transmis par de la colle silicone DC93-500 durant une exposition aux UV sous vide [80]. Les résultats de leur test à EOT5 (10200 ESH) ont été simulés avec notre modèle, dont la courbe est tracée en vert clair : la dégradation est très proche.

Annexe N Autres approches incluant plus de deux types de cellules solaires

N.1 Deux ordres de diffraction

Solution 1 : 2 cellules SJ différentes et 1 cellule DJ

La fraction du flux incident parvenant sur les cellules PV dans la configuration lamellaire ressemble au graphique N.1. La transition entre les deux types de cellules est assez abrupte, et l'intervalle spectral atteignant la cellule VIS est relativement court. Celui incident aux cellules IR est par contre plus large, et pourrait éventuellement être plus efficacement converti par deux jonctions, telle une DJ par exemple, comme le suggère le schéma de droite de la Figure N.1.

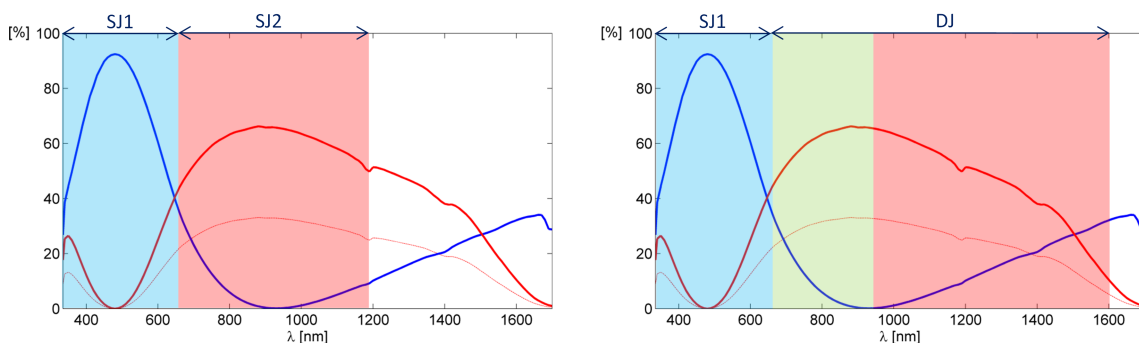


FIGURE N.1 – Fraction de la lumière incidente parvenant sur les cellules PV dans la configuration lamellaire. Les courbes bleues correspondent à la fraction de lumière atteignant la cellule visible, les rouges à la fraction parvenant sur les cellules IR. Les zones colorées esquissent la possibilité d'utilisation d'une DJ sur la zone initialement couverte par la cellule IR.

Dans ce cas, en effectuant le calcul idéal comme en section 9.3, nous obtenons des résultats supérieurs à 446 W/m^2 , pour des énergies de bandes interdites respectivement de 1.9 eV et 0.9/1.4 eV, $\lambda_{\text{blaze}} = 470 \text{ nm}$. Ce résultat est bien meilleur qu'avec des simples jonctions, mais n'est pas très représentatif car la DJ ne peut pas correspondre à la combinaison optimale à cause des conditions sur les correspondances entre matériaux.

En prenant alors des cellules existantes proches de l'optimum (cellules InGaP et GaAs/InGaAs), nous obtenons une puissance de sortie supérieure à 320 W/m^2 , soit très similaire à la puissance de sortie d'un concentrateur classique focalisant sur une DJ. Cependant, à 0.7° d'incidence, elle passe déjà à moins de 76% de la puissance initiale et en absolu à moins de 90% d'un système composé exclusivement de SJ... Pour cette configuration, $\theta_{90\%} < 0.5^\circ$.

Ainsi, même si la puissance de sortie est améliorée, cette solution présente deux inconvénients majeurs :

1. Elle utilise une cellule DJ, possédant les problèmes de combinaison de matériaux et courant en série, bien qu'a priori moins importants que ceux d'une TJ.
2. La lumière étant dispersée spectralement sur la cellule, dans le cas d'une incidence non-nulle ce sont majoritairement les grandes longueurs d'onde qui sortent de la

cellule en premier, rendant la seconde jonction limitatrice, et dégradant par-là directement toute la cellule : la tolérance à l'angle d'incidence est beaucoup plus faible dans ce cas-ci. L'inhomogénéité spectrale peut aussi réduire l'efficacité de la cellule DJ, comme discuté en section 15.2.2.

Son intérêt dépend donc encore une fois de l'importance de la tolérance au dépointage que l'on peut se permettre, et de la puissance de fin de vie escomptée. L'avantage de la DJ point de vue puissance de sortie est néanmoins bien réel.

Si l'on veut éviter l'usage de DJ mais malgré tout tenter d'augmenter les puissances de sortie, on peut se diriger vers d'autres solutions basées sur des SJ comme précédemment. Deux possibilités sont proposées dans les points suivants : travailler avec 3 cellules SJ collectant deux voire 3 ordres de diffraction.

Solution 2 : 3 cellules SJ différentes

Pour éviter l'utilisation d'une DJ, on peut aussi choisir de placer deux SJ l'une à côté de l'autre, sur la zone couverte initialement par une unique SJ. Dans ce cas, une grande dispersion spectrale sur la cellule est nécessaire (pour maximiser la transition entre les gammes spectrales). C'est la configuration blazée qui offre la solution la plus efficace. D'après la Figure 10.16, on peut facilement imaginer placer deux types de cellules PV sur la zone couverte par la cellule VIS initialement, convertissant plus efficacement le flux parvenant au centre. Pour une combinaison de cellules GaAs, Si et InGaAs, on atteint des puissances de sorties supérieures à 325 W/m^2 , soit meilleures que dans le cas d'utilisation d'une DJ. Cependant dans ce cas-ci, la distance entre ordres initialement prévue pour répondre à la tolérance aux erreurs de pointage demandée n'est plus présente puisque couverte par une autre cellule : le système perd donc sa tolérance à l'angle d'incidence. Dans le cas simulé, à 0.5° d'incidence, la puissance de sortie n'est plus que de 274 W/m^2 , soit environ 90% de celle d'un système à 2 SJ tel que présenté avant. Encore une fois, la tolérance au dépointage est largement réduite.

La configuration lamellaire peut aussi être adaptée pour placer trois types de jonctions dans son plan focal. La configuration optimale (dispersion spectrale maximale et spatialement bien définie) nécessite une optimisation adaptée de la période le long de la cellule. Encore une fois, cette conversion plus efficace du spectre parvenant initialement sur les cellules IR permet d'augmenter la puissance de sortie du système jusqu'à plus de 330 W/m^2 . Cependant, pour les mêmes raisons que précédemment, les distances entre cellules sont réduites et ne suffisent plus à assurer une bonne tolérance à l'angle d'incidence. Dans le cas présent, $\theta_{90\%}$ descend de $\pm 0.7^\circ$ à 0.35° . Un exemple des fractions de la lumière incidente parvenant sur les différentes cellules est repris en Figure N.2 pour illustration.

Conclusion

En conclusion, la tolérance au dépointage est le paramètre le plus critique pour le design du concentrateur. Cette tolérance est néanmoins nécessaire principalement pour les applications spatiales, cas dans lequel l'utilisation de plus de deux jonctions semble compromise. Cependant, l'utilisation de plusieurs jonctions ouvre encore d'autres possibilités, et dans une situation de pointage plus précis, elle permet d'atteindre des performances

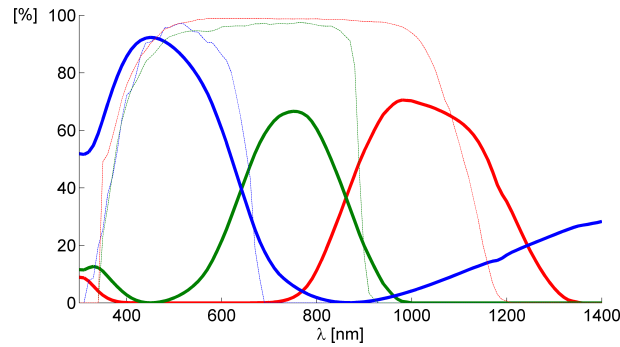


FIGURE N.2 – Fraction du flux parvenant sur les cellules PV (lignes épaisses), avec les EQEs correspondantes (fines lignes).

se rapprochant encore un peu des TJ, sans leurs désavantages. Ce cas peut par exemple se présenter pour des applications terrestres : le pointage est beaucoup plus précis, on pourrait envisager un système circularisé pour augmenter le taux de concentration, et finalement l’usage de SJ, incluant des jonctions moins chères (en Silicium par exemple), pourrait contribuer à réduire le coût des systèmes à concentration solaire pour des puissances de sortie comparables. La séparation spectrale a en plus quelques avantages pour les applications terrestres.

N.2 Trois ordres de diffraction

Comme nous l’avons abordé en section 9.1, toute modification de la forme du réseau blazé ou lamellaire entraîne l’apparition et l’augmentation des ordres de diffraction supérieurs, ce qui n’est pas à notre avantage. Néanmoins, certaines modifications pourraient offrir d’autres possibilités. L’idée serait alors d’utiliser 3 ordres de diffraction (0 et ± 1) comme pour la configuration lamellaire, mais cette fois de miser sur une différenciation spectrale entre les ordres opposés : nous pourrions alors utiliser trois types de cellules PV, tout en conservant une certaine distance entre les ordres nécessaire à la tolérance à l’angle d’incidence.

Ce type de réseau peut par exemple être obtenu via un réseau blazé composé de marches [182], un graphique d’exemple est repris en Figure N.3. On aurait alors deux possibilités :

1. Système non-symétrique : 3 types de cellules PV correspondant respectivement aux 3 ordres de diffraction focalisés. Le désavantage principal étant le faible taux de concentration global dû à l’absence de superposition de la cellule centrale.
2. Système symétrique : 1 SJ pour l’ordre 0, et une DJ pour la superposition des ordres 1 et -1. Contrairement à la configuration à DJ présentée dans le point précédent, les longueurs d’onde des ordres 1 et -1 seront superposées (deux ordres différents superposés grâce à la configuration géométrique), ce qui devrait permettre de conserver une tolérance à l’incidence raisonnable.

Bien sûr, le souci est que la somme des trois ordres de diffraction est inférieure à celle des deux ordres de diffraction des configurations lamellaire et blazée, et qu’une partie demeure dans l’ordre 0 au lieu d’être diffractée au-dessus de 700 nm. L’avantage ne peut alors provenir que de l’usage de trois cellules et donc de la meilleure conversion de chaque

partie du spectre, malgré une efficacité de diffraction inférieure.

Même avec les EQEs idéales, la configuration choisie avec trois cellules dont les Eg valent 1.95/1.3/0.95 eV et $\lambda_{\text{blaze}}=490$ nm, obtient un résultat moins bon que ceux des configurations précédemment développées avec deux SJ (340 contre 365 W/m²). Ceci à cause de la répartition non-idéale entre les ordres de diffraction. Avec la cellule DJ InGaP/InGaAs, les résultats sont semblables à ceux des configurations lamellaire et blazée classiques (2 types de SJ). La DJ n'est par contre pas parfaitement adaptée aux courbes de séparation spectrale, les résultats pourraient donc être meilleurs avec une cellule DJ optimisée.

Bien sûr, tout ceci est modulable, et peut-être, si le but est l'usage de cellules particulières, cette configuration donnera-t-elle de bons résultats. De même, la modulation de forme mériterait de plus amples investigations, mais dans un contexte particulier connaissant les cellules à utiliser.

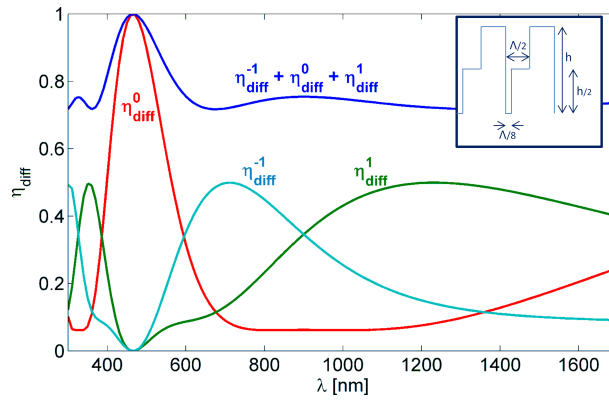


FIGURE N.3 – Efficacité de diffraction du réseau à deux marches.

Annexe O Indices de réfraction

O.1 Indices de réfraction des colles NOA

En Figure O.1 sont repris les indices de réfraction de tous les matériaux optiques utilisés. Remarquons la proximité des indices du NOA76 et du verre, qui explique son utilisation dans le projet G2D, ainsi que l'écart avec le NOA61 et le silicone DC93-500, à l'origine des décalages en longueurs d'onde lors de leur usage, par rapport au réseau original en verre.

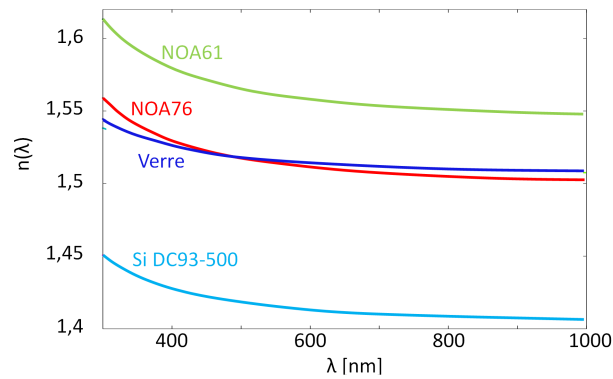


FIGURE O.1 – Indices de réfraction des colles NOA61, NOA76, et du silicone DC93-500 (mesures effectuées au CSL), et du verre BK7 selon l'approximations de Sellmeier [183].

O.2 Indice de réfraction du PMMA

L'indice de réfraction utilisé pour le PMMA est celui mesuré au CSL par réfractométrie sur un échantillon fourni par Sirris. L'interpolation des résultats est reprise en Figure O.2. L'absorption utilisée pour les simulations est actuellement celle du silicone DC93-500, mais elle est de toute façon très faible dans le visible et pour des épaisseurs de quelques millimètres.

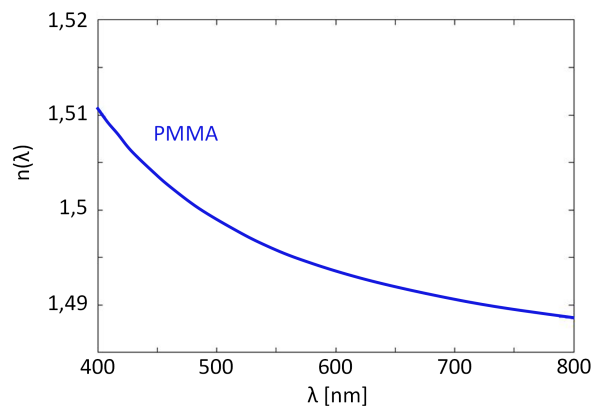


FIGURE O.2 – Interpolation de l'indice de réfraction du PMMA sur base des mesures effectuées au réfractomètre au CSL.

L'équation décrivant l'indice de réfraction est la suivante,

$$n = \sqrt{A + \frac{B1.\lambda^2}{\lambda^2 + B2} + \frac{C1.\lambda^2}{\lambda^2 + C2} + \frac{D1.\lambda^2}{\lambda^2 + D2}}; \quad (\text{O.1})$$

avec les paramètres donnant les meilleurs résultats : $A = 1.026$, $B1 = 0.6972$, $B2 = -0.001529$, $C1 = 0.2722$, $C2 = -0.001597$, $D1 = 0.2037$, et $D2 = -0.04259$.

Le réfractomètre est un Abbemat MW [94], dont la précision de mesure est de ± 0.00004 sur l'indice de réfraction, soit largement sous la tolérance déterminée en section 13.1.4. Quant à l'approximation de Sellmeier utilisée pour l'interpolation, elle devrait assurer une précision jusqu'à la quatrième décimale entre les données expérimentales et celles interpolées [95]. Cette erreur est donc négligeable, donnant lieu à moins de 0.0006 à 0.0014 mm de décalage dans le plan focal pour une erreur de 0.00004 à 0.0001 sur l'indice de réfraction et un angle d'incidence de 5 degrés.

Annexe P Caractéristiques du réseau de diffraction G2D

Les caractéristiques du réseau de diffraction utilisé dans le cadre du projet G2D sont reprises dans la Table P.1.

Fournisseur	Richardson Gratings from Newport Corporation
N°de catalogue	34010FL07-131R
N°de série	1596-1-4-1
Date	22/10/2012
Grooves/mm	45 (22,2222µm de période)
Revêtement	/
Courbure	Plan
Longueur d'onde de blaze	500 nm
Matériau	Float Glass (BK7)
Angle de blaze	2.22°
Surface gravée	46×46 mm
Dimensions	50×50×6 mm

TABLE P.1 – Caractéristiques du réseau de diffraction commercial acheté dans le cadre du projet G2D.

Annexe Q Montage optique pour la mesure de l'efficacité de diffraction

Montage optique

Le dispositif optique mis en place pour la mesure des efficacités de diffraction est repris en Figure Q.1.

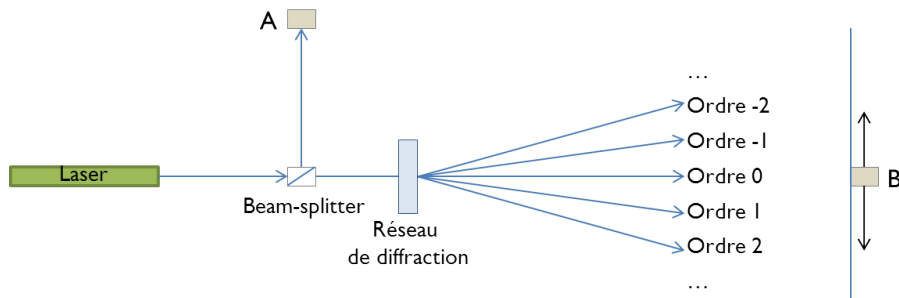


FIGURE Q.1 – Montage optique pour la mesure de l'efficacité du réseau de diffraction.

Un laser fait office de source. Nous avons à disposition principalement 4 lasers, décrits dans le point suivant. Le faisceau source est séparé en deux parties par un *beam-splitter* (non-polarisant, environ 50-50). Le premier faisceau atteint directement le premier détecteur A, qui l'enregistre : ce sera notre témoin, permettant de surveiller une variation temporelle de la sortie du laser. Le second faisceau traverse le réseau de diffraction, et le détecteur B, placé pour récupérer l'ordre de diffraction voulu, enregistre la mesure. Pour chaque mesure, le détecteur est aligné perpendiculairement au faisceau qui lui est incident. Pour avoir la valeur absolue de l'efficacité, la méthode suivante est employée :

1. Mesure sans réseau de diffraction : $I_B/I_A = \text{Ref}$
2. Mesure avec le réseau de diffraction : $I'_B \cdot \eta_{\text{diff}}/I'_A = \text{Mes}$
3. Résultat : $\eta_{\text{diff}} = \text{Mes}/\text{Ref}$ puisque, même si le laser fluctue un peu, le rapport $I_B/I_A = I'_B/I'_A$ reste constant dans le temps étant donné que la division proportionnelle du beamsplitter n'évolue pas.

Pour minimiser les erreurs dues à la diffusion, au placement et à l'alignement, une mesure de *Ref* est faite avant chaque mesure, elle-même réalisée au minimum deux fois, une fois au début, puis une fois à la fin, pour vérifier la répétabilité de la mesure et s'assurer que la référence n'a pas évolué.

Ces mesures sont réalisées pour les 5 longueurs d'onde à disposition, soit 405 nm, 543 nm, 633 nm, 665 nm et 670 nm, en 9 points différents du réseau testé (master et répliques).

Ces mesures sont ponctuelles. Ainsi, pour vérifier la courbe sur un spectre continu, la mesure de l'ordre 0 (seul ordre de diffraction que l'on peut sélectionner seul) a été réalisée en lumière blanche. Les résultats obtenus sont quasiment superposés, avec un exemple en Figure Q.2 : la ligne rouge bruitée représentant la mesure en lumière blanche est superposée aux mesures ponctuelles (points et croix rouges). Nos points de mesures à l'ordre 1 notamment sont donc supposés être corrects.

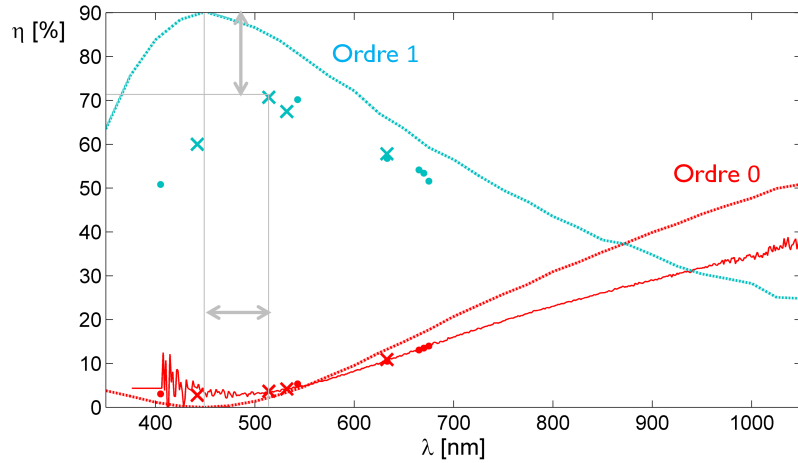


FIGURE Q.2 – Points de mesure de l'efficacité de diffraction du réseau en verre (croix et points). La courbe rouge bruitée correspond à la mesure de l'ordre 0 en lumière blanche, confirmant la précision des mesures ponctuelles au laser.

Lasers

Nous avons à disposition 3 lasers fonctionnant à des longueurs d'onde de 405 nm, 543 nm et 633 nm, ainsi qu'un laser modulable pouvant fonctionner entre 664 et 679 nm. Les caractéristiques de ces lasers sont reprises dans la Table Q.1.

Type	λ	Modèles
Laser violet-bleu	405 nm	Crystal laser [®] , Modèle N° BCL-050-405-S
Laser vert HeNe	543 nm	Research Electro Optics, Inc., Modèle LHGP0051
Laser rouge HeNe	633 nm	JDS Uniphase, Modèle 1135P
Laser rouge	664-679 nm	New Focus [®] , Velocity Tunable Diode Laser, Modèle 6308

TABLE Q.1 – Caractéristiques des lasers utilisés.

Annexe R Matériel pour le montage expérimental

Les caractéristiques du matériel utilisé pour le dispositif expérimental de caractérisation de l'élément optique du projet G2D, sont reprises ci-dessous. L'ensemble est aussi décrit en référence [151]. Dans les grandes lignes, la face avant de l'élément optique est placée face à un simulateur solaire, et dans le plan focal de l'élément optique, une fibre optique raccordée à un spectromètre et déplacée par un moteur 3 axes, permet de cartographier spatialement et spectralement le résultat. Ce sont ces mesures qui seront comparées par la suite à nos résultats théoriques.

Le simulateur solaire Une photo du simulateur solaire est reprise en Figure R.1. Il est composé d'une lampe Xenon CERMAX[®] de 750 W, boostée en UV, et d'un système optique de mise en forme du faisceau, permettant de collimater la lumière avec un demi-angle de divergence autour de 0.25° (voir mesure de la divergence en Figure R.2). La densité de puissance de sortie se situe autour de 250 W/m^2 , avec une uniformité spatiale de 97% sur une surface de $15 \times 15 \text{ cm}^2$, ce qui est largement

supérieur à la dimension des lentilles que l'on étudie ($1 \times 2\text{cm}^2$). La stabilité de la source a été monitorée sur plus d'1 heure, avec moins de 3% de variations en moyenne. Une mesure prend environ 20 minutes, donnant lieu à une variation de maximum 2% (avant chaque mesure, une référence est enregistrée pour minimiser l'effet de cette légère variation). Le spectre de la source mesuré de la même façon est repris en Figure R.3.

La description complète est reprise dans le rapport Tropomi [163], projet pour lequel le simulateur initial [162] a été amélioré.



FIGURE R.1 – Simulateur solaire [151].

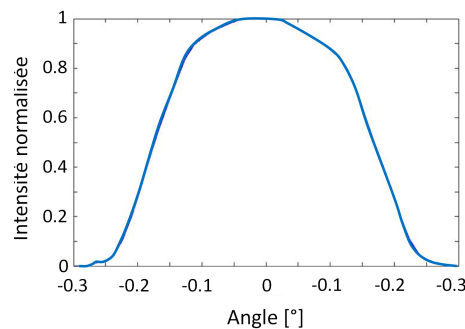


FIGURE R.2 – Divergence de la source mesurée dans le cadre du projet Tropomi.

Bloc senseur Le bloc senseur est placé après l'élément optique, pour mesurer et enregistrer la densité de puissance spectrale dans le plan focal. Il est composé d'un système de translation à 3 axes de chez Thorlabs (NRT100 [184]), possédant des pas de déplacement de moins de 100 nm, et d'un spectromètre UV-Vis « AvaSpec-2048 » [185] couplé avec une fibre optique fixée sur le système de translation. Ce montage permet donc de prendre une image d'un plan parallèle à la section de la lentille (donc de voir la tache focale), et de se déplacer dans plusieurs plans en variant la distance à la lentille, comme illustré en Figure R.4.

La fibre utilisée est une fibre de 910 μm de diamètre, ce qui est supérieur à la taille de l'ordre 0. Ainsi, un *pinhole* de 50 μm [186] a été placé devant elle. Le *pinhole* a une épaisseur de 12.5 μm . La fibre ayant un diamètre de 910 μm , toute lumière parvenant

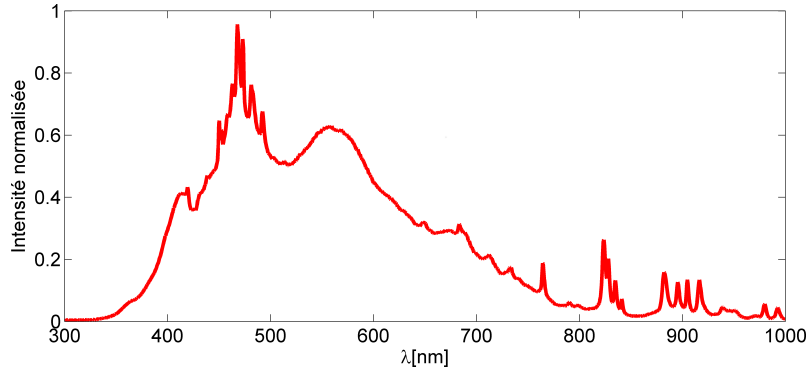


FIGURE R.3 – Spectre normalisé de la référence pour les mesures.

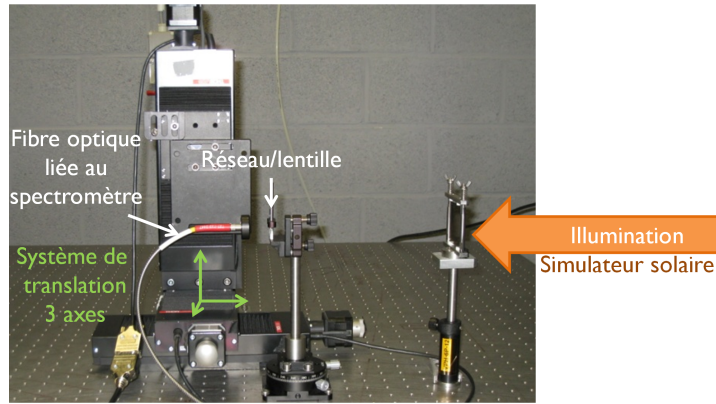


FIGURE R.4 – Dispositif de mesure : l'élément optique analysé est placé sur une monture fixe, exposée à la sortie d'un simulateur solaire. Une fibre optique liée à un spectromètre est fixée sur un système de translation 3 axes, permettant de cartographier spatialement et spectralement différents plans focaux. Dans le cas présent, une densité optique neutre a été ajoutée entre l'élément optique et le simulateur solaire de sorte à éviter une saturation du senseur dans le plan focal.

dans le *pinhole* atteindra la fibre. La question est la partie absorbée éventuellement par le *pinhole* lui-même. Avec une épaisseur de $12.5\ \mu\text{m}$, l'angle d'entrée est limité à 75° , ce qui n'a donc pas d'effet dans notre configuration.

La fibre utilisée a une réponse angulaire de 0.22, définie à 90%, ce qui laisse un cône d'acceptance de plus de deux fois 12 degrés. Cependant, le miroir d'entrée du spectromètre a un $F\#$ de 4, ce qui limite les angles d'entrée à des valeurs inférieures à 7.6° seulement.

$$NA = \frac{1}{2.F\#} = \frac{1}{8}$$

Des mesures ont donc été réalisées de sorte à caractériser la réponse angulaire du spectromètre et de la fibre, puisqu'en théorie les angles parvenant dans le plan focal de notre élément optique, et donc à l'entrée de la fibre, peuvent aller au-delà de 12° rendant le spectromètre fortement limitatif. Les résultats sont présentés en Figure R.5. Les mesures comprenant le spectromètre sont effectuées avec une source blanche collimatée. Pour les mesures de la fibre seule (avec un détecteur silicium en sortie de la fibre à la place du spectromètre), on a utilisé la source blanche et un laser étalé par

filtre spatial puis collimaté : les résultats sont les mêmes. Notons que l'imprécision des mesures et toute erreur sur la forme de la réponse angulaire peut entraîner une modification de la forme des taches focales mesurées ou simulées.

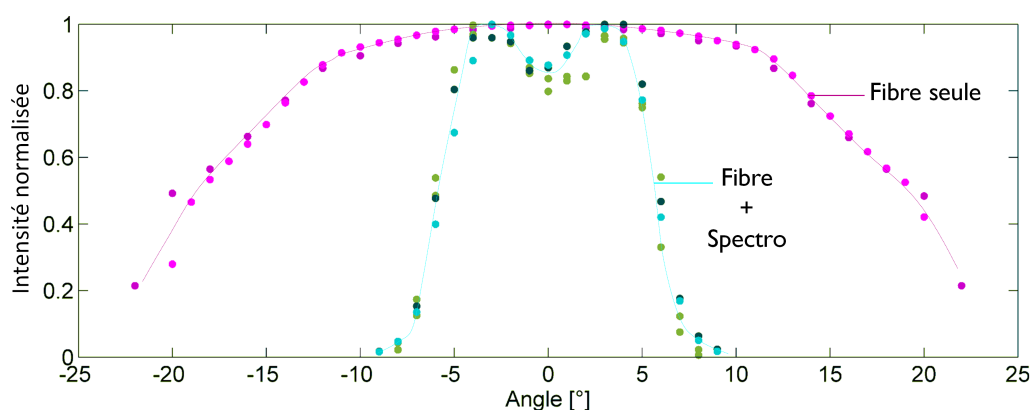


FIGURE R.5 – Réponses angulaires mesurées du spectromètre combiné à la fibre optique et de la fibre seule.

Support optique L'élément optique est placé sur une monture optique dont l'inclinaison est ajustable (Figure R.6).

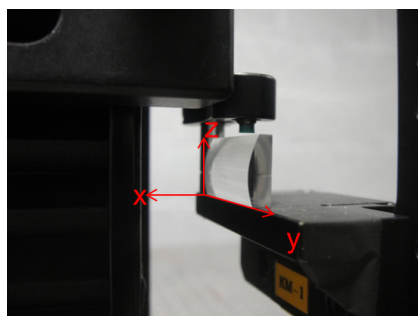


FIGURE R.6 – Monture de la lentille avec définition des axes [151] .

Détecteur CCD Les images prises notamment en lumière blanche, ont été enregistrées directement grâce à un CCD DCU224M B|W, d'une résolution de 1024×768 pixels. La dimension d'un pixel est de $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$. Sa sensibilité s'élève à plus de 60% entre 400 et 700 nm de longueur d'onde.

Annexe S Correction des erreurs d'alignement

Les étapes pour les corrections d'erreurs d'alignement dans le montage expérimental sont reprises en Figure S.1.

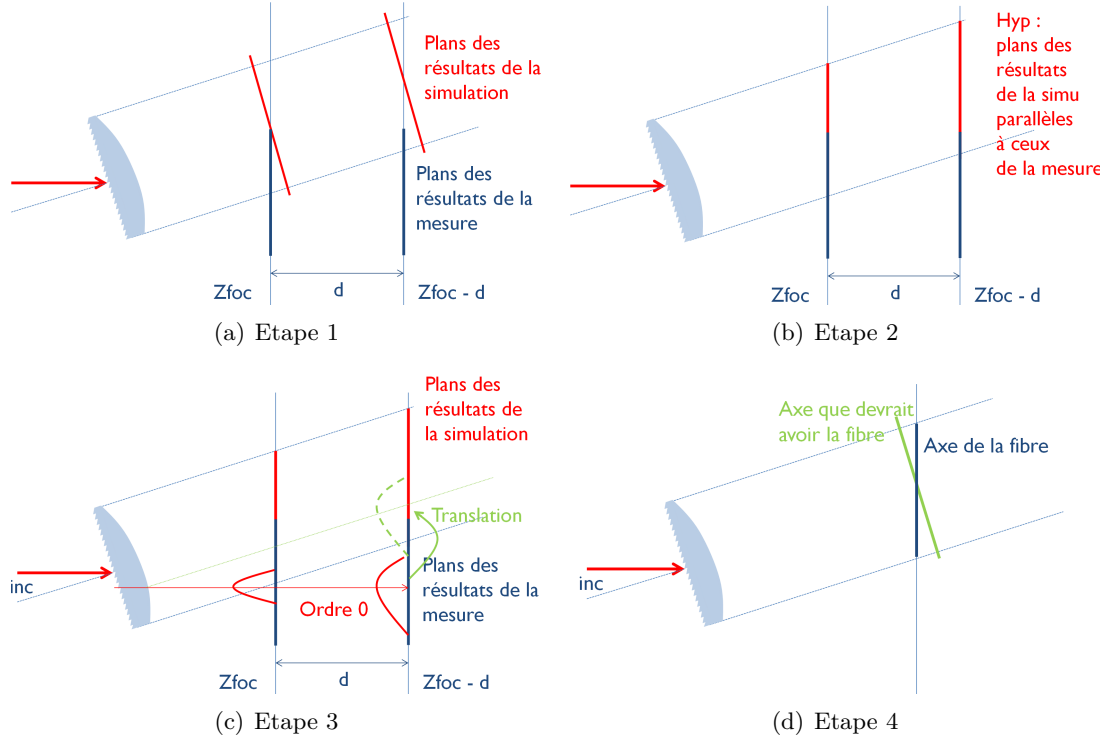


FIGURE S.1 – Etapes pour l'intégration des désalignements dans les mesures et simulations. *Etape 1* : Identification des plans de simulation et de mesure. *Etape 2* : Hypothèse des petits angles, le plan de simulation est considéré comme parallèle à celui des mesures. *Etape 3* : Les positions des taches focales mesurées sont beaucoup plus proches que dans les simulations, il faut donc les ramener dans le même système de mesure par une translation appropriée. *Etape 4* : L'axe de la fibre optique n'est pas exactement perpendiculaire à la référence de la lentille, il faut donc décaler la réponse angulaire de la fibre en fonction de l'incidence.

Annexe T Caractéristiques du silicone Sylgard 184

Les différences de propriétés mécaniques entre les deux silicones sont reprises en Table [T.1](#). La viscosité est le point le plus différent du point de vue du processus de réplcation, même si a priori une base plus visqueuse ne devrait pas modifier le résultat. Pour le reste, les différences ne devraient pas être fondamentales. Notons que les propriétés mécaniques sont un peu modifiées selon la température du four [\[164\]](#).

	Sylgard 184	Silicone DC93-500
Mix ratio	10 :1	10 :1
Viscosité base	5.2 Pa.sec	8.4 Pa.sec
Durometer shore A [187]	44 (47 si 75°C pour curing [164])	40
Specific Gravity	1.04	1.08
Linear CTE (by DMA)	340×10^{-6} 1/°C	300×10^{-6} 1/°C
Tensile Strength	7.1 MPa	7 MPa
Elongation	120 %	110% (140% at break)

TABLE T.1 – Comparaison des propriétés mécaniques entre le silicone Sylgard 184 et le silicone DC93-500 (données du fabricant Dow Corning et de la référence [\[93\]](#)).

Publications

réalisées durant la thèse

Ce travail de thèse a mené à plusieurs publications (posters et papiers) et communications orales lors de congrès. Un résumé chronologique est repris ci-dessous, aussi accessible dans myULg et sur Orbi, via le lien suivant :

<http://orbi.ulg.ac.be/browse?type=author&value=Michel,%20C%C3%A9line%20p129312>

1. C. Michel & S. Habraken, *Study of a space solar concentrator based on a diffractive/refractive optical combination*, poster présenté lors du *Comice Energie Solaire*, Jambes, Belgique, 23 avril 2012.
2. C. Michel, J. Loicq, F. Languy, A. Mazzoli & S. Habraken, *Study of a solar concentrator for space based on a diffractive/refractive optical combination*, communication orale lors du Congrès OSA Renewable Energy and the Environment Meeting - Optics for Solar Energy, Eindhoven, Pays-Bas, 11-14 novembre 2012.
3. C. Michel, J. Loicq, F. Languy, A. Mazzoli & S. Habraken, *Study of a solar concentrator for space based on a diffractive/refractive optical combination*, AIP Conference Proceedings **1556**, 97-100 (2013). Présenté lors de la 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, Miyazaki, Japon, 15-17 avril 2013.
4. C. Michel, J. Loicq, F. Languy & S. Habraken, *Optical study of a solar concentrator for space applications based on a diffractive/refractive optical combination*, Solar Energy Materials & Solar Cells **120**, 183-190 (2014).
5. C. Michel, J. Loicq, T. Thibert & S. Habraken, *Study of a solar concentrator for space based on a diffractive/refractive optical combination*, communication orale et article dans les proceedings lors de la 10th European Space Power Conference, Noordwijkerhout, The Netherlands, 13-17 avril 2014.
6. P. Blain, C. Michel, L. Clermont, F. Languy, M. Décultot, S. Habraken, C. Lenaerts, K. Fleury-Frenette, D. Vandormael & J. Loicq, *Spectral splitting planar solar concentrator : Design and Experimental testing Preliminary results*, Proceedings of SPIE **9140** (2014).
7. C. Michel, J. Loicq, T. Thibert & S. Habraken, *Optical Study of a Spectrum Splitting Solar Concentrator based on a Combination of a Diffraction Grating and a Fresnel Lens*, poster et article dans les proceedings de la 11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, Aix-les-Bains, France, 13-15 avril 2015.
8. C. Michel, J. Loicq, T. Tanguy & S. Habraken, *Optical study of diffraction grating/-Fresnel lens combinations applied to a spectral splitting solar concentrator for space applications*, Applied Optics **54**(22), 6666-6673 (2015).

9. *G2D* : participation à l'écriture d'un article récapitulatif du projet, en cours de rédaction